

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Vlastnosti alkalicky aktivovaných systémů
Properties of alkali-activated systems

Student:

Martin Chládek, DiS.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jana Boháčová

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Chládek, DiS.**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R019 Stavební hmoty a diagnostika staveb
Téma: **Vlastnosti alkalicky aktivovaných systémů**
Properties of alkali-activated systems

Zásady pro vypracování:

Předmětem bakalářské práce je ověření vlastností alkalicky aktivovaných systémů, připravených zejména na bázi vysokopepní jemně mleté granulované strusky a vybraných typů aktivátorů, a porovnání dosažených technických parametrů s vlastnostmi receptur na bázi komerčních stavebnin. Na připravených zkušebních tělesech budou zjišťovány základní fyzikálně-mechanické a také vybrané trvanlivostní vlastnosti vytvořeného kompozitu.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1.] KOŇAŘÍK, J.: *Vliv aktivátoru na základní vlastnosti alkalicky aktivovaných systémů* Bakalářská práce. VŠB - TUO, Fakulta stavební, 2014, Ostrava. 90 s.
- [2.] ŠKVÁRA, F.: *Alkalicky aktivované materiály - geopolymery*. Praha, 2007. ISBN 978-80-7080-004-1. Dostupné z: <http://www.vscht.cz>. VŠCHT v Praze, Ústav skla a keramiky.
- [3.] PROVIS, John L. a Jan Stephanus Jakob VAN DEVENTER. *Geopolymers: structure, processing, properties and industrial applications*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009, xiv, 454 pages. Woodhead Publishing in materials. ISBN 14-398-0970-4.
- [4.] DAVIDOVITS, J.: *Geopolymer: chemistry*. 2nd ed. Saint-Quentin: Institute Géopolymre, 2008, 587 s. ISBN 29-514-8201-9.
- [5.] ČESKÁ ROZVOJOVÁ AGENTURA, O.P.S.: *Současný stav výzkumu v oblasti geopolymérů*. 2005, 285 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jana Boháčová**

Datum zadání: 31.10.2014

Datum odevzdání: 04.05.2015



Ing. Libor Židek
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Anotace

CHLÁDEK, M.: *Vlastnosti alkalicky aktivovaných systémů* Bakalářská práce. VŠB – TUO. Fakulta stavební, 2015, Ostrava. 57 s.

Již řadu let se jednotlivé výzkumy zabývají problematikou alkalicky aktivovaných systémů, které se jeví jako vhodná náhrada pojiv na bázi cementů.

Cílem práce je ověřování fyzikálně – mechanických a trvanlivostních vlastností na vytvořených kompozitech.

V rámci experimentu byly zjištěny na tělesech pevnosti v tahu 7 – 10 MPa a v tlaku 40 – 80 MPa, odolnost povrchu proti působení chemicky rozmrazovacích látek nebyla v tomto experimentu prokázána. Objemové hmotnosti vykazovaly hodnoty 2220 – 2280 kg/m³. Dále byla prokázána mrazuvzdornost kromě směsi, kde bylo použito jako aktivátor sodné vodní sklo.

Klíčová slova: Alkalicky aktivovaný, Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska, Aktivátor, Běžný stavební písek

Annotation

CHLÁDEK, M.: *Properties of alkali – activated systems*. Bachelor thesis. VŠB – TUO. Faculty of Civil Engineering, 2015, Ostrava. 57 pages.

For many years, various researches deal with the issue of alkali-activated systems that are suitable as a replacement binders based on cements.

The aim of the work is to explore physical - mechanical and durability properties of prepared composites.

In the experiment were determined tensile strength 7 - 10 MPa and a compressive strength reached 40 - 80 MPa, surface resistance to chemical de-icing substances was not demonstrated in this experiment. Densities exhibited values 2220 - 2280 kg /m³. Also frost resistance of mixtures was demonstrated, except mixture, where was modified sodium silicate used as the activator.

Keywords: Alkali-activated, Finely ground granulated blast furnace slag, Activator, Building sand

Obsah

Úvod.....	5
Teoretická část.....	6
1. Alkalicky aktivované systémy.....	6
1.1. Historie výzkumu.....	6
1.2. Možnosti použití ve stavebnictví	8
1.2.1. Dopravní stavitelství	8
1.2.2. Průmyslová, občanská a bytová výstavba	8
1.2.3. Rekonstrukce památkových objektů	9
2. Porovnání cementového betonu s alkalicky aktivovanými systémy	10
2.1. Výhody alkalicky aktivovaných systémů	10
2.2. Nevýhody alkalicky aktivovaných systémů.....	11
2.3. Výhody a nevýhody v používání cementů.....	11
3. Zjednodušený popis vniklých hydratačních produktů.....	13
3.1. Cement a jeho hydratační produkty	13
3.2. Alkalicky aktivované systémy a jejich hydratační produkty	14
4. Používané suroviny pro alkalicky aktivované systémy	15
4.1. Aktivátory	15
4.1.1. Hydroxid sodný	15
4.1.2. Uhličitan sodný	15
4.1.3. Křemičitan sodný (vodní sklo).....	16
4.1.4. Síran sodný	16
4.2. Pojiva	16
4.2.1. Popílky	16
4.2.2. Strusky.....	17
4.2.3. Metakaolin.....	17
4.2.4. Přírodní pucolány	17
4.3. Plnivo	17
4.3.1 Mikrosilika (křemičité úlety)	17
4.3.2 Prosívky.....	18
4.3.3 Cihelná drť	18
4.3.4 Betonový recyklát	19

4.3.5 Křemičité písky	19
Praktická část.....	20
5. Použité suroviny	20
5.1. Záměsová voda	20
5.2. Běžný stavební písek.....	20
5.3. Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska	20
5.4. Aktivátory	21
5.4.1. Draselné vodní sklo	21
5.4.2. Metakřemičitan sodný	21
5.4.3. Sodné vodní sklo	22
5.4.4. Desil AL	22
6. Použité zkušební postupy	23
6.1. Objemová hmotnost ztvrdlé směsi.....	23
6.3. Zkouška pevnosti těles	24
6.3.1. Pevnost v tahu za ohybu.....	24
6.3.1. Pevnost v tlaku	25
6.4. Zkouška mrazuvzdornosti.....	26
6.5. Odolnost povrchu za působení vody a chemických rozmrazovacích látek	27
7. Příprava receptury a výroba zkušebních těles	29
7.1. Postup míchání.....	30
7.2. Zhotovení zkušebních těles.....	30
7.3. Uložení a ošetřování zkušebních těles	31
8. Materiálové vlastnosti.....	31
8.1. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu po 1 dni.....	31
8.2. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu po 7 dnech	32
8.3. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu po 28 dnech	32
8.4. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu po 60 dnech	33
8.4. Objemové hmotnosti	36
9. Vyhodnocení zkoušky CHRL.....	36
10. Vyhodnocení zkoušky mrazuvzdornosti	41
Závěr.....	43
Seznam použité literatury.....	44
Přílohy	46

Seznam obrázků	47
Seznam tabulek	48

Seznam značení

A	Velikost zkoušeného povrchu pro CHRL v m^2
D	Objemová hmotnost ztvrdlé směsi v kg/m^3
DESIL AL	Aktivátor DESIL AL1 – koloidní roztok s přísadou hliníku
DVS 1,7	Aktivátor na bázi draselného vodního skla se silikátovým modulem 1,7
F_c	Zatížení při porušení pro zkoušku v tlaku v kN
F_f	Lomové zatížení pro zkoušku tahu za ohybu v kN
CHRL	Zkouška odolnosti povrchů proti působení chemických rozmrazovacích látek
MKS	Aktivátor na bázi metakřemičitanu sodného
R_c	Pevnost v tlaku v MPa
R_f	Pevnost v tahu za ohybu v MPa
SVS 1,5	Aktivátor na bázi sodného vodního skla se silikátovým modulem 1,5
V	Objem tělesa v m^3
b	Délka boční strany tělesa pro zkoušku v tahu za ohybu v mm
k_{M100}	Součinitel mrazuvzdornosti po 100 cyklech
l	Vzdálenost podpor u zkoušky v tahu za ohybu v mm
m	Hmotnost v g
Σm	Součet všech hmotností odpadů od prvního do n-tého cyklu v g
μ_{M100}	Aritmetický průměr pevností zmrazovaných těles v MPa
μ_p	Aritmetický průměr pevností referenčních těles v MPa
ρ_a	Hmotnostní odpad u zkoušky CHRL v g/m^2

Úvod

V dnešní době ve stavebnictví převažují pojiva na bázi cementu, jejichž výroba značně zatěžuje životní prostředí. Snahou tak je částečně nahradit tato pojiva jinými materiály, z nichž jednu skupinu alternativních pojiv tvoří alkalicky aktivované systémy. Při výrobě těchto materiálů se zpracovávají především druhotné suroviny vzniklé průmyslovou výrobou. Nejčastěji to jsou popílky a vysokopecní strusky. Pro aktivaci těchto latentně hydraulických a pucolánových materiálů je nutno dodat do systému alkalické prostředí, které zajišťuje vhodný aktivátor.

V předcházejících výzkumech na katedře stavebních hmot byl používán především normový písek, který je však od běžného písku dražší. Proto cílem této práce bylo ověření vlivu použitého typu aktivátoru a běžného stavebního písku na základní fyzikálně-mechanické a trvanlivostní vlastnosti alkalicky aktivovaných hmot. Díky použití běžného písku se zmenší náklady na výrobu alkalicky aktivovaných materiálů.

Byly připraveny čtyři druhy směsí na bázi alkalicky aktivované vysokopecní strusky s rozdílnými druhy aktivátorů.

Pro možnost srovnání byla vyhotovena také tělesa z komerčně dostupných materiálů, konkrétně byl použit portlandský cement 52,5R a bílý cement 52,5R.

V experimentu byl místo normovaného křemičitého písku používán běžný stavební písek frakce 0/4 od firmy Českomoravské štěrkovny a.s. z provozovny Tovačov.

V rámci experimentu byly na připravených tělesech stanoveny pevnosti v tahu a tlaku po jednom, sedmi, osmadvaceti a šedesáti dnech zrání, byla testována odolnost povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, dále byla provedena zkouška mrazuvzdornosti a stanovení objemové hmotnosti.

Teoretická část

1. Alkalicky aktivované systémy

Alkalicky aktivované systémy, často nepřesně označovány jako geopolymery jsou materiály vznikající syntetickou alkalickou aktivací aluminosilikátových látek v prostředí s vysokým pH za normální teploty. Název geopolymer, který definoval a nechal si patentovat francouzský prof. J. Davidovits je podmíněn použitím čistého metakaolinu jako pojiva. V případě použití jiných výchozích surovin jsou vzniklé materiály obecně označovány jako alkalicky aktivované systémy [1, 2].

1.1. Historie výzkumu

V současnosti se některé vědecké práce zabývají teorií o historii využití geopolymérů již ve starověku, kdy předpokládáme použití těchto systémů ke stavbě zikkuratů a pyramid. Hlavním představitelem této myšlenky se stal již zmiňovaný francouzský profesor. Za zmínku také stojí starořímské stavitelství, v němž se podle různých studií a průzkumů dochovaných staveb s velkou pravděpodobností také používalo systémů na bázi alkalicky aktivovaných systémů.

Novodobý výzkum těchto materiálů trvá již přes 80 let, kdy první zmínka o využití alkalicky aktivovaných materiálů v průmyslu byla v keramických závodech Olsen v 30. letech 20. století. V padesátých letech se geopolymery zabývala americká armáda a taktéž začal výzkum na Ukrajině, který vedl V. D. Gluchovský. Od 70. let se výzkum rozšířil do dalších institucí.

Ve Francii se tímto tématem zabývalo několik vědeckých týmů. Hlavním představitelem geopolymérisace se stal Joseph Davidovits. Používá alkalicky aktivované látky na bázi kaolinů, které tuhnou a tvrdnou za běžných teplot.

V České republice se dnes problematikou geopolymerních hmot zabývá několik institucí a to:

Ústav skla a keramiky Vysoké školy chemicko-technologické v Praze se zabývá problematikou geopolymerních materiálů na bázi slínku, strusek, popílků a jílových minerálů

od roku 1973. Výsledky dlouholetého výzkumu najdeme v řadě disertací, diplomových prací a vědeckých článků. Poznatky z oblasti geopolymérů jsou předmětem řady českých i zahraničních patentů. [4]

V současnosti je intenzivně rozvíjeno pod vedením Doc. RNDr. Františka Škváry DrSc. a ve spolupráci se stavební fakultou ČVUT materiálové a inženýrské studium geopolymerních hmot, zejména geopolymerních betonů na bázi alkalicky aktivovaných popílků (POPbetonů) a dalších odpadních surovin. Současně probíhá výzkum vlivu agresivního prostředí na vlastnosti geopolymerních materiálů. Ve spolupráci se stavební praxí jsou hledány možnosti inženýrských aplikací tohoto materiálu. [4]

Ústav průmyslové keramiky FMMI VŠB-TU v Ostravě intenzivně rozvíjí oblast problematiky přípravy a studia vlastností geopolymerních materiálů na bázi metalurgických strusek, elektrárenských popílků a kalcinovaných jíílů. V posledních 10 letech se pozornost výzkumu především pod vedením doc. Ing. Václavy Tomkové, CSc. zaměřovala na možnosti přípravy alkalicky aktivovaných pojiv a kompozitů využívajících strusky z výroby oceli a z redukce kovonosných metalurgických odpadů.

Dalšími tématy je možnost přípravy lehčených hmot, kompozitů s vyšší tepelnou, resp. korozní odolností a studium možností identifikace vývoje a změn fázového složení geopolymerních pojiv. [4]

Od roku 2000 provádí specializované pracoviště pod vedením Doc. RNDr. Pavla Straky, DrSc. Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR výzkum geopolymerních materiálů se zaměřením na využití stávajících odpadových a nevyužitých jílových surovin technologií geopolymerní syntézy. Geopolymery jsou používány pro inhibici a detoxikaci dalších odpadových a nebezpečných materiálů z průmyslových výrob v ČR. [4]

Na fakultě chemické VUT v Brně se alkalicky aktivovanými materiály zabývá tým vědců pod vedením prof. Brandštetra. Výzkum se zabývá využitím geopolymerních materiálů na bázi odpadních látek, a to především vysokopecní strusky a popílků. [4]

Dnes se materiály na bázi alkalicky aktivovaných systémů stávají hojně zkoumanými a jsou prováděny jejich první aplikace ve stavebnictví.

1.2. Možnosti použití ve stavebnictví

Pravděpodobně nejvyšší míru využití ve výstavbě může mít geopolymerní hmota. Vzhledem ke svým fyzikálním parametrům je schopna nahradit jednotlivý sortiment na bázi cementů, ale i jiných pojiv. V zemích s absencí surovin na výrobu cementu jsou geopolymery vhodným uchazečem ve stavební výrobě. Z tohoto důvodu je nutno cement dovážet, jehož následkem je pak stoupající cena.

Používání geopolymerních hmot v jednotlivých odvětvích stavebnictví můžeme rozdělit do tří skupin. První skupinou je dopravní infrastruktura. Druhá zahrnuje občanskou, průmyslovou a bytovou výstavbu. Třetí skupina představuje stavební a umělecké rekonstrukce. [2]

1.2.1. Dopravní stavitelství

Dopravní stavby se řadí mezi nejvíce prosazované potřeby, zejména kvůli neustále stoupající dopravě. Geopolymerní beton tak může nahradit pojezdovou plochu silnic a dálnic, stejně tak parkovací a letištní plochy. Výhodou materiálu jsou krátké časy tvrdnutí, kdy už po čtyřech hodinách je možné po povrchu pojíždět vozidlem. Tato vlastnost prudce urychlí opravy a výstavbu dálnic.

Ostatní doplňující výrobky, jako svodidla, obrubníky a informační tabule je možné vyrábět z geopolymerní hmoty. U železničního stavitelství je možnost vyrábět různé prefabrikáty protihlukových stěn a nástupišť.

V městském prostředí lze využít výrobky z geopolimerů na náměstí, veřejné i soukromé parky, prostranství nákupních a relaxačních center. Mezi tyto prvky patří např. sloupky veřejného osvětlení, lavičky, dlažby, chodníky a atd. [2]

1.2.2. Průmyslová, občanská a bytová výstavba

Občanské a průmyslové stavby, stejně jako specifická skupina bytové výstavby, představuje novou výzvu pro geopolymerní stavební hmoty. Vyztužené geopolymerní vazníky a sloupky mohou nahradit ocel a lepené dřevěné nosníky ve výstavbě průmyslových hal.

V nové výstavbě lze najít uplatnění pro sendvičové panely, nebo sendvičové tvárnice. Vzhledem k vysoké únosnosti je možné postavit několikapatrový dům.

Výstavbou pomocí panelového systému z geopolymerních hmot se zabývala australská společnost Strongwall International LTD, která si tuto technologii nechala patentovat. [2]

Česká rozvojová agentura Praha, a.s. se zabývá výzkumem, vývojem a aplikací geopolymerních poživ.

Na obrázku (Obr. 1) je znázorněn jeden z mála produktů této společnosti pod obchodní značkou AC Stone.



Obr. 1: Elektrický topný panel AC Stone, vyroben na bázi geopolymerních hmot [7]

1.2.3. Rekonstrukce památkových objektů

Další možnost jak využít geopolymerní hmoty nastává v odvětví rekonstrukce spolu s památkářskou činností. Dnes můžeme pomocí geopolimerizace vytvořit konglomerovaný kámen, který se podobá přírodnímu. Tyto hmoty se mohou uplatnit i jako lepidla při opravách památek. [2]

2. Porovnání cementového betonu s alkalicky aktivovanými systémy

Tato kapitola obsahuje celkové zhodnocení těchto materiálů.

2.1. Výhody alkalicky aktivovaných systémů

Jedna z pozitivních výhod je, že při použití alkalicky aktivních systémů nedochází k vysoké produkci CO_2 . Lze využívat odpadní průmyslové materiály a také cihelný a betonový recyklát. U alkalicky aktivovaných systémů můžeme použít nevhodné plnivo nebo vysoký podíl jemných částic, kde by u betonu způsoboval zhoršení některých vlastností.

Z toho plyne, že tento materiál méně zatěžuje životní prostředí a šetří tak zásoby nerostných surovin. Odpadá u nich energeticky náročný výpal vápence, který je základní surovinou pro výrobu cementu.

Tyto materiály jsou schopny do své struktury absorbovat těžké kovy a radioaktivní odpad aniž by došlo ke změně struktury nebo k ovlivnění procesu tuhnutí a tvrdnutí. Využití možnosti uzavřít a solidifikovat odpad do geopolymerních matic otevírá nové směry aplikací.

Pro přípravu směsi není potřeba speciálních strojů nebo zařízení. Příprava je podobná jako u výroby čerstvého betonu spolu se zařízením, které již známe.

Další výhodnou vlastností je menší smrštění a vývin hydratačního tepla je až o polovinu menší než u cementů. Díky tomuto umožňuje výstavbu masivních konstrukcí.

U alkalicky aktivovaných kompozitů dále můžeme zdůraznit jejich nehořlavost, teplotní stabilitu do 1250°C a nízkou vodopropustnost. Vytvořené kompozity nabývají vysokých počátečních pevností, už po dvou hodinách mohou dosahovat až 10 MPa.

Alkalicky aktivované systémy jsou oproti běžným cementům mimořádně odolné vůči působení agresivních látek z vnějšího prostředí, ať se již jedná o vodu mořskou nebo odpadní.

V České republice se nacházejí velká ložiska kaolinu, která jsou základní surovinou pro výrobu metakaolinu. Jedná se o základní surovinu pro výrobu geopolymerních hmot. [17, 18]

2.2. Nevýhody alkalicky aktivovaných systémů

Při výrobě alkalicky aktivovaných materiálů přicházíme do styku s žiravinami. Jedná se o některé aktivátory, jsou to velice silné zásady. Částečně tento problém můžeme vyřešit použitím pevného metakřemičitanu sodného.

Poměrně vysoká pořizovací cena u některých aktivátorů.

Přebytek alkálií v systému a jejich případný transport způsobující výkvěty.

Dále se potýkáme s krátkým časovým intervalem na zpracování směsi vlivem rychlého tuhnutí a tvrdnutí. Lze částečně tuto dobu prodloužit boritany a fosfáty, které se osvědčily u strusko-alkalických systémů.

Za použití jílu, které musí být upravovány tepelnou aktivací (metakaolin), i když při významně nižších teplotách než je nutné při výrobě cementu.

Výroba základní geopolymerní směsi je snadná v laboratoři, ale dvousložková pojivová směs, z nichž jedna složka je alkalický roztok, je v praxi daleko komplikovanější, než prosté smíchání cementu vody a písku. [17, 18]

2.3. Výhody a nevýhody v používání cementů

Dnes máme více než 150-ti letou zkušenost s výrobou cementu a betonových konstrukcí, existují ekonomicky silné výrobní společnosti. Průmyslová výroba cementářských slínek je zvládnuta ze všech pohledů a je snadná. Obrovské investice do výroby cementu jsou kompenzovány vyráběným množstvím. [20]

Mezi výhody betonových konstrukcí lze zařadit [6]:

- Pevnost betonu v tlaku je velmi rozmanitá, volitelná podle potřeby.
- Trvanlivost betonových konstrukcí je při dobré údržbě neobyčejně velká na vzduchu i pod vodou. Koroze betonu závisí na použitém kamenivu a na množství a druhu cementu. Betony s nízkým obsahem cementu nazýváme hubené (jsou náchylnější ke korozi), betony s vyšším množstvím cementu jsou mastné.
- Ohnivzdornost - závisí na druhu použitého kameniva, při kvalitním kamenivu až 800 C°, ŽB do 600 C°.
- Tvárnost - je velkou předností monolitických betonových konstrukcí. Přímo na stavbě můžeme vytvářet nejrozmanitějších tvarů a průřezů podle statických požadavků.

- Odolnost - betonu proti mechanickému poškození je obdobná jako u přírodního kamene a závisí na prostředí, ve kterém se nachází.
- Hospodárnost - betonové konstrukce je dána velkou trvanlivostí a levnou výrobou z dosažitelných surovin.

Nevýhody [6]:

- Hmotnost - závisí na použitém kamenivu. Pohybuje se mezi 2000 až 2400 kg.m⁻³ u prostého betonu a mezi 2300 až 2600 kg.m⁻³ u železového betonu. Velká hmotnost nám zvláště vadí u prefabrikátů, pro které potřebujeme mohutné zvedací stroje a speciální vozy pro dopravu, což nepříjemně zvedá náklady stavby.
- Tepelná vodivost - je tím větší, čím větší je hmotnost betonu. Proto musíme konstrukce pozemních staveb pečlivě tepelně izolovat.
- Zvuková vodivost - je rovněž vysoká a závisí na hutnosti betonu. Na ochranu proti šíření zvukových vln betonových konstrukcí používáme různé zvukové izolace.
- Objemové změny – u konstrukcí vznikají při tuhnutí a tvrdnutí betonu a při teplotních změnách konstrukcí. Nežádoucí vlivy objemových změn odstraňujeme zhotovením dilatačních spár.
- Rekonstrukce - betonových konstrukcí je velmi namáhavá a nákladná. Velká pevnost a tvrdost betonu, i když jsou předností tohoto materiálu, jsou při opravě příčinou toho, že každá úprava konstrukce je velmi pracná a tím také nákladná.
- Karbonatace betonu, alkalicko-křemičitá reakce.

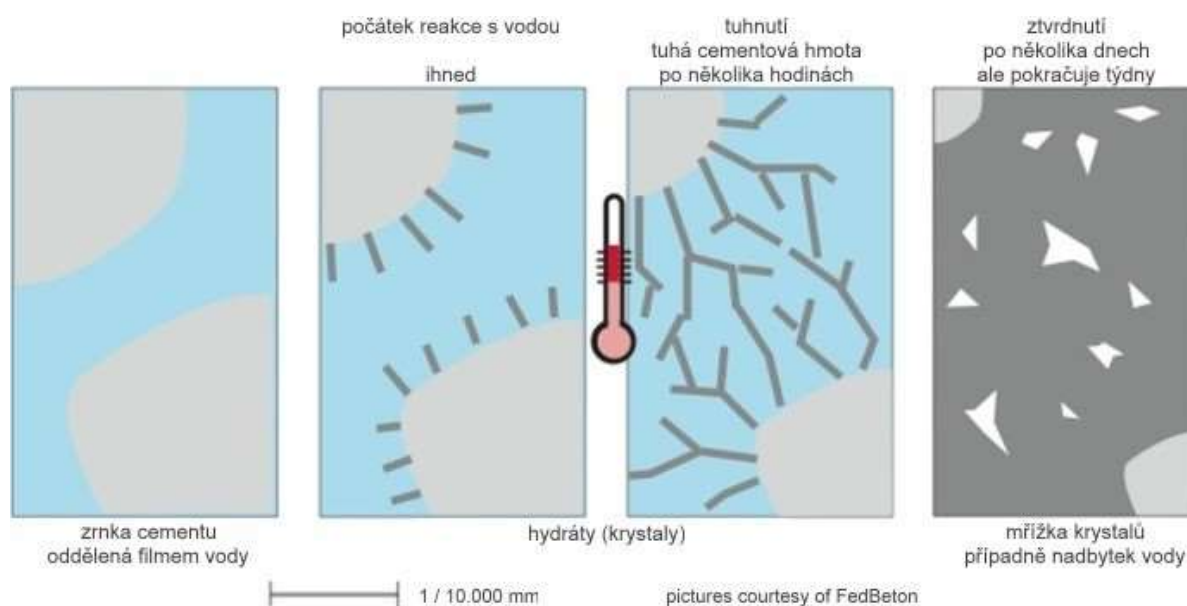
3. Zjednodušený popis vniklých hydratačních produktů

3.1. Cement a jeho hydratační produkty

Při smíchání cementu s vodou dochází k reakci zvané hydratační proces, při němž narůstá teplota a vznikají hydratační produkty jednotlivých slínkových minerálů. Tento proces je dodnes těžké popsat z důvodu nejednoznačných odpovědí na toto téma. [19]

Zjednodušeně proces hydratace lze popsat takto:

Slínkový minerál alit C_3S odštěpuje $Ca(OH)_2$ a přechází v hydrosilikátový gel, který tvoří slupku okolo zrna původního cementu. S postupující reakcí se gelové vrstvy spojují; C-S-H gel tvoří jehlicovité útvary, jež vyplňují prostor mezi zrny cementu. Hydroalumináty a sulfoaluminoferyty vznikající hydratací krystalizují naopak z roztoku. Oba uvedené procesy, tj. tvorba C-S-H gelu a krystalků hydroaluminátové fáze probíhají souběžně. Kromě toho ještě z přesyceného roztoku krystalizují destičkovité krystalky $Ca(OH)_2$. S pokračujícími reakcemi se další voda chemicky váže, takže gelová hmota postupně tuhne a nabývá pevnosti. Spolu se vznikajícími krystalky $Ca(OH)_2$ v ní, jako ve spojovací hmotě, jsou uloženy dosud nezreagované slínkové minerály (Obr. 2). [5]



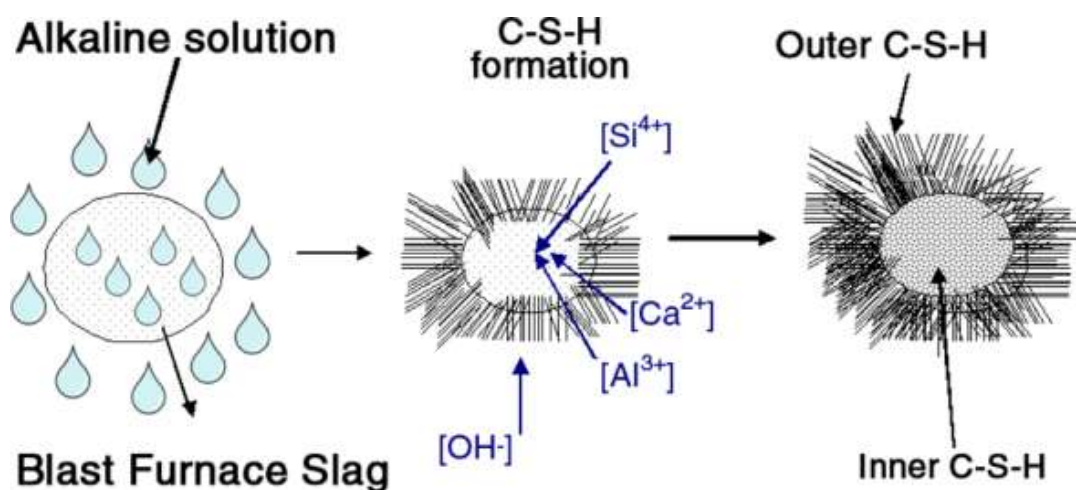
Obr. 2: Hydratace cementu [15]

3.2. Alkalicky aktivované systémy a jejich hydratační produkty

Alkalicky aktivované systémy neobsahují portlandit, který u cementů představuje nejslabší článek.

Při použití vysokopecní granulované strusky jako pojiva vznikají při hydrataci především C-S-H gely s malým obsahem zeolitické fáze (Obr. 3). Pokud je použit metakaolin nebo popílek, vznikají zeolitické fáze typu $(\text{Na}, \text{K})_n\{-(\text{Si-O})_z\text{-Al-O}\}_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$. [1]

Výsledný produkt alkalicky aktivovaných systémů, vzniklý při hydratačních procesech a polymerizací, je závislý na poměrech vstupních veličin, jejich vlastnostech a také na vlastnostech okolního prostředí. [17,18]



Obr. 3: Teoretický model reakčního mechanismu alkalicky aktivované strusky podle Fernándeze-Jiméneze [16]

4. Používané suroviny pro alkalicky aktivované systémy

Výsledné produkty alkalicky aktivovaných látek se mohou výrazně lišit ve vlastnostech. Jsou zde závislosti na použití jednotlivých vstupních surovin. Závisí na poměrech jednotlivých složek, použití druhu plniva, způsobu přípravy a na podmínkách tuhnutí a tvrdnutí. [17,18]

4.1. Aktivátory

Jako aktivátory do alkalicky aktivovaných pojiv a betonů se obvykle používají alkalické hydroxidy a soli.

Nejběžněji používaný je hydroxid sodný a křemičitan sodný (vodní sklo). Způsobuje rychlé tuhnutí, proto závisí na koncentraci sodné složky, pokud je její množství nižší, dochází ke snížení pH a pomalejšímu tuhnutí. [17]

4.1.1. Hydroxid sodný

Hydroxid sodný (NaOH) je vedle uhličitanu sodného a kyseliny sírové jednou z nejdůležitějších surovin chemického průmyslu, vyrábí se elektrolýzou solanky. Používá se ve formě vodného roztoku nebo jako bezvodý.

V pevném stavu je vysoce hygroskopický. Reaguje s oxidem uhličitým za vzniku uhličitanu sodného.

Hydroxid sodný můžeme použít jako urychlovač hydratace pojiva, ale po 7-14 dnech od hydratace dochází k poklesu pevnosti. Pro naprostou většinu použití je potřeba roztok hydroxidu sodného. [3]

4.1.2. Uhličitan sodný

Uhličitan sodný nebo soda, je bílý bezvodý práškový nebo granulovaný materiál obsahující výrazně nad 99% Na_2CO_3 .

Uhličitan sodný se používá jako příměs do portlandského cementu. Při nízké dávce působí jako urychlovač, při vysokých dávkách naopak jako retardér. Uhličitan sodný může

být velmi účinný alkalický aktivátor pro pojivové materiály na bázi portlandského cementu a vápence. [3]

4.1.3. Křemičitan sodný (vodní sklo)

Křemičitan sodný je obecný název pro skupinu sloučenin s obecným vzorcem $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$.

Křemičitan sodný byl široce používán jako urychlovač pro beton. Hlavně u stříkaných betonů.

Křemičitan sodný je nejúčinnější alkalický aktivátor pro velké množství pojivových systémů, používá se pro výrobu hydratovaných silikátových prášků, suchých lepících směsí, adheziv, speciálního cementu k fixaci nebezpečného, toxického a radioaktivního odpadu, betonu odolného vůči kyselinám, atd. [3]

4.1.4. Síran sodný

Síran sodný (Na_2SO_4), v jeho přirozené formě se vyskytuje ve dvou základních minerálech:

- thenardit – krystalická látka, bezvodá,
- mirabilit – hydratovaná forma, obecně nazývaná jako Glauberova sůl.

Mnoho výzkumů potvrdilo, že síran sodný může být velmi efektivní alkalický aktivátor pro portlandské cementy a vápna. Obvykle podporuje tvorbu ettringitu na začátku a konci tvrdnutí. [3]

4.2. Pojiva

4.2.1. Popílký

Vznikají jako vedlejší produkt při spalování tuhých paliv, který je zachycován na odlučovačích. Jedná se jemnozrnný prášek s kulovitými zrny o velikostech 0,001 – 0,1 mm. Obsahuje amorfní SiO_2 , mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) a křemen. V nepatrném množství obsahují nespálené organické složky a radioaktivní látky. Chemické složení popílků závisí na typu spalovaného paliva (hnědé, černé uhlí). Pro výrobu geopolymérů se doporučuje používat popílků ze spalování hnědého uhlí, který obsahuje až 20% CaO . [19]

4.2.2. Strusky

Strusky jsou pevné odpady hutní výroby, které vznikají reakcí doprovodných složek obsažených v rudě se struskotvornou přísadou (CaO). Pro výrobu pojiv je nejvhodnější vysokopecní struska vznikající při výrobě železa. Strusky ocelářské, slevárenské i jiné se používají pro svou tvrdost spíše jako kamenivo. Obsahují vápenaté složky, hořečnaté křemičitany a hlinitokřemičitany. Aby se docílilo amorfní fáze, musí se struska z pece co nejrychleji ochladit a granulovat. Toto nám zajistí hydraulické vlastnosti strusky. [19]

4.2.3. Metakaolin

Vzniká výpalem kaolinů a kaolinitických jílů při cca 600 – 900°C. Metakaolin obsahuje částice o velikosti 0,5 – 20 μm a je to vysoce reaktivní pucolán. [19]

Částečná náhrada portlandského cementu metakaolinem může zvýšit vývoj pevnosti, snížit propustnost a zlepšit trvanlivost betonu. [3]

4.2.4. Přírodní pucolány

Pucolán je křemičitý nebo hlinitokřemičitý materiál, který má pojivové schopnosti za podpory hydroxidu vápenatého. Obsahují kolem 70% SiO₂ a Al₂O₃ (oxid hlinitý), dalšími doprovázejícími oxidy jsou Fe₂O₃, CaO, MgO, oxid sodný (Na₂O) a oxid draselný (K₂O). Hlavními zástupci těchto materiálů jsou: sopečné popílký, pemza, zeolity. [19]

4.3. Plnivo

V používání kameniva do alkalicky aktivovaných systémů, nejsme nikterak omezení. Lze použít kamenivo, které již známe při výrobě betonových směsí, např. pro výrobu těžkých a lehkých betonů. Další možností je zpracování jednotlivých odpadů vznikajících při demolicích staveb a těžbě kameniva.

Jednotlivé materiály popsané v této kapitole jsou vhodné pro výrobu alkalicky aktivovaných systémů. Jednak se mohou podílet na aktivačních procesech (mikrosilika) a zlepšovat tak některé vlastnosti výsledných kompozitů.

4.3.1 Mikrosilika (křemičité úlety)

Vzniká jako odpad při výrobě křemíku. Křemičité úlety bílé obsahují 87 – 99 % amorfního oxidu křemičitého. Křemičité úlety šedé neboli ferosilicia obsahují 85 – 90 % amorfního SiO_2 a jsou šedavé barvy díky obsahu uhlíku. Jsou velice reaktivní a mají vysoký měrný povrch až 20 000 m^2/kg . Vykazují vysokou pucolánovou aktivitu, což znamená, že za běžných teplot reagují s hydroxidem vápenatým. [19]

4.3.2 Prosívky

Jsou jemné podíly kameniva, které vznikají při drcení hornin. Jsou zachycovány v odlučovačích a hromadí se v lomech jako odpad. Jejich zrnitost je značně proměnlivá, mají ostrohranná zrna do velikosti až 4 mm. Prosívkami lze nahrazovat část písku ve složení betonu, ale zvyšuje vodní součinitel při dosažení stejné zpracovatelnosti. [20]

4.3.3 Cihelná drť

Vzniká drcením zlomků cihel nebo cihelné suti. Cihelná drť má široké spektrum využití v jiných stavebních oborech. Možnou aplikací je výroba cihlobetonu. Ten je možno využívat jako výplňové zdivo pro monolitické konstrukce, k výrobě vibrolisovaných tvárnic a stěnových prvků (jejich slisování má výhodu v eliminaci dotvarování konstrukce) nebo např. k výrobě prefabrikovaných prvků.

Dále lze cihelný recyklát použít jako plnivo malt pro zdění s využitím drobných frakcí ($< 4 \text{ mm}$). Výhodou je vyšší tepelný odpor než malty s přírodním kamenivem. Podle přídavku pojiva lze dosáhnout pevnosti u malty od 1 do 10 MPa.

Další možnost aplikování lze najít ve výrobě drenážního betonu používaného pro plošné odvodnění a odvzdušnění. Pro výrobu se využívá frakce 4-8 mm nebo 8-16 mm s příměsí drceného betonu, cementu a popílku.

V pozemních komunikacích se využívá spíše pro zlepšování zemin podloží a vyšších částí náspů, zejména pak ke zlepšení zrnitosti. [8]

4.3.4 Betonový recyklát

Drcený beton je využíván jako kamenivo z ekologických důvodů, jednak dochází k úspoře přírodních zdrojů kameniva a omezíme tím jejich skládkování. Použití tohoto recyklátu jako kameniva do betonu naráží na jisté problémy: odpad není dostatečně homogenní, zrna mají menší pevnost a mrazuvzdornost, vznik velkého podílu jemné frakce 0/4. Tyto problémy ovlivňují výsledné vlastnosti vyrobeného betonu. [20]

4.3.5 Křemičité písky

Vznikají ze základního minerálu křemene (SiO_2) nacházejícího se v zemské kůře. Za zdroje se považují ložiska, která obsahují minimálně 96 % SiO_2 . [19]

Ve stavebnictví se křemenný písek používá k výrobě dlažebních kostek, malty, betonu, epoxidových podlah, spárování vydlážděných ploch, stavebních lepidel, pískování, jako aditiv atd.

Praktická část

5. Použité suroviny

V této kapitole jsou stručně popsány suroviny použité v experimentu.

5.1. Záměsová voda

Pro tvorbu čerstvé směsi byla použita pitná voda z vodovodního řadu, jež splňuje kritéria a požadavky dané normou ČSN EN 1008.

5.2. Běžný stavební písek

Byl použit štěrkopísek frakce 0/4 – Tovačov pro všechny navržené záměsi. Použitý písek je dodáván firmou Českomoravské štěrkovny a.s. spolu s certifikátem (Příloha 1).

5.3. Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska

Práškové latentně hydraulické pojivo vyrobené semletím vysušené vysokopecní granulované strusky, která splňuje požadavky dle ČSN EN 197-1 na požadované parametry. Použitá struska pochází od firmy Kotouč Štramberk, spol. s r. o. (Tab. 1, Příloha 2)

Tab. 1: Základní charakteristiky strusky dle prohlášení o shodě.

Základní charakteristiky	Množství
Pevnost v tlaku po 7 dnech (index účinnosti)	$\geq 45 \%$
Pevnost v tlaku po 28 dnech (index účinnosti)	$\geq 70 \%$
Počátek tuhnutí	$t < t_{\text{cementu}} \cdot 2x$
Jemnost	$\geq 400 \text{ m}^2/\text{kg}$
Obsah oxidu hořečnatého	$\leq 18 \%$
Obsah sulfidů	$\leq 2,0 \%$
Obsah síranů	$\leq 2,5 \%$
Ztráta žiháním	$\leq 3,0 \%$
Obsah chloridů	$\leq 0,1 \%$
Obsah vlhkosti	$\leq 1,0 \%$

5.4. Aktivátory

Byly použity různé druhy aktivátorů od firem Vodní sklo a.s., Kittfort Praha, s.r.o. a Penta s.r.o.

5.4.1. Draselné vodní sklo

Vodní sklo draselné je čirá nebo slabě zakalená viskózní kapalina, bezbarvá nebo lehce nažloutlá, neomezeně mísitelná s vodou.

Používá se k výrobě speciálních dezinfekčních a odmašťovacích prostředků, jako náplň do alkalických akumulátorů, jako pojivo do speciálních žáruvzdorných vyzdívek. Pro výrobu fasádních nátěrových hmot na silikátové bázi. [9]

Při míchání bylo použito draselné vodní sklo se silikátovým modulem 1,7. V tabulce č. 2 jsou vyjádřeny výrobcem vlastnosti a hodnoty jednotlivých složek. (Příloha 3)

Tab. 2: Složení vodního skla draselného

Vlastnost	Značení: DVS 1,7
Obsah K_2O min. % hm.	26,0 – 26,5
Obsah SiO_2 min. % hm.	28,2 - 29
Sušina min. % hm.	54,2 – 55,75
Molární poměr SiO_2/K_2O	1,67 – 1,73
Hustota v °Bé	51 - 53
Hustota v kg/m^3	1650 - 1670
Viskozita mPa.s	110 - 230

5.4.2. Metakřemičitan sodný

Metakřemičitan sodný je bílý krystalický prášek o nesourodé velikosti částic, snadno rozpustný ve vodě na alkalicky reagující roztok.

Používá se zejména k výrobě průmyslových detergentů, pracích a dezinfekčních prostředků. [9]

V tabulce č. 3 jsou znázorněny jakostní ukazatelé dané výrobcem. (Příloha 4)

Tab. 3: Složení metakřemičitanu sodného

Vlastnost	Značení: MKS
Obsah SiO ₂ min. % hm.	27,8 – 29,2
Obsah Na ₂ O min. % hm.	28,0 – 29,4
Molární poměr SiO ₂ /Na ₂ O	0,98 – 1,02
Ztráta žiháním (600°C) min. % hm.	42,0 – 44,0
Sypná hmotnost v kg/m ³	800 – 1000
pH (1% roztok)	12,5

5.4.3. Sodné vodní sklo

Vodní sklo sodné je čirá nebo slabě zakalená viskózní kapalina našedlé nebo narůžovělé barvy, alkalické reakce, neomezeně mísitelná s vodou.

Používá se na výrobu alkalických křemičitanů používaných do odmašťovacích, pracích a dezinfekčních prostředků, jako slévárenská surovina pro výrobu forem, jako složka do protipožárních nátěrů a nehořlavých stavebních materiálů, jako pojivo v různých lepidlech a tmelech, tzv. chemicky tvrzených směsí a pro povrchovou úpravu papíru, dřeva a textilu. [9]

V tabulce č. 4 jsou uvedeny hodnoty jednotlivých složek vodního skla, jak je uvádí výrobce. Toto vodní sklo bylo dále upravováno 33 % roztokem NaOH pro získání silikátového modulu 1,5. (Příloha 5)

Tab. 4: Složení sodného vodního skla

Vlastnost	Značení: SVS 1,5
Obsah SiO ₂ min. % hm.	15,8
Obsah Na ₂ O min. % hm.	10,8
Molární poměr SiO ₂ /Na ₂ O	1,46
Hustota kg/m ³	1352

5.4.4. Desil AL

DESIL AL je koloidní roztok s přísadou hliníku, který se svým složením a vlastnostmi liší od klasických koloidních roztoků alkalických silikátů, označovaných jako vodní skla. Je to koloidní roztok, jehož kostra je velmi podobná zeolitickým strukturám. Hliníkové atomy vytváří lokální záporný náboj, který pevněji lokalizuje iont Na.

Používá se jako pojivo ve slévárenství, zpracování odpadů, výroba pracích a čisticích prostředků, výroba tepelně – izolačních materiálů. [9]

V tabulce č. 5 jsou popsány výrobcem jednotlivé parametry. (Příloha 6)

Tab. 5: Složení sodného vodního skla

Vlastnost	Značení: DESIL AL
Obsah SiO ₂ min. % hm.	18 - 28
Obsah Na ₂ O min. % hm.	13 - 21
Molární poměr SiO ₂ /Na ₂ O	1,4 – 2,0
Obsah hliníku min. % hm.	0,1 - 2
Hustota v kg/m ³	1400 - 1600

6. Použité zkušební postupy

Pro alkalicky aktivované systémy nejsou vydány platné normy pro jejich zkoušení. Proto jsou v této práci použity normy pro zkoušení malt nebo betonů.

6.1. Objemová hmotnost ztvrdlé směsi

Postup zkoušky se stanoví na základě normy ČSN EN 12390 - 7. Zkušební těleso se vyjme z místa uložení, zváží se a změří jeho rozměry.

Objemová hmotnost se pak vypočte dle vztahu (1):

$$D = \frac{m}{V} [kg/m^3] \quad (1)$$

D - objemová hmotnost ztvrdlé směsi v kg/m³

m - hmotnost zkušební tělesa v kg

V - objem tělesa v m³

Výsledná hodnota se zaokrouhlí na nejbližších 10 kg/m³. [11]

6.3. Zkouška pevnosti těles

Provedena dle normy ČSN EN 196 - 1. Kde se jednotlivé vzorky v daném stáří 1, 7, 28 dní odzkouší na pevnost v tlaku a tahu za ohybu. Rozměry zkušebních těles jsou ve tvaru trámečků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

6.3.1. Pevnost v tahu za ohybu

Trámeček se uloží do zkušebního stroje jednou z bočních stran na válcové podpory tak, aby jeho podélná osa byla k podporám kolmá. Zatížení se vynakládá přes zatěžovací válec kolmo na protilehlou boční stranu s rovnoměrnou rychlostí (50 ± 10) N/s až do zlomení.

Zkoušeny byly tři trámečky z jednotlivých směsí.

Poloviny trámečků byly ihned podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku.

Pevnost v tahu za ohybu se vypočte dle vztahu (2):

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} [MPa] \quad (2)$$

R_f – pevnost v tahu za ohybu v MPa

b – strana čtvercového průřezu trámečku v mm

F_f – zatížení vyložené na střed trámečku při zlomení v N

l – je vzdálenost mezi podporami v mm

Pevnost v tahu za ohybu se vyjádří průměrnou aritmetickou hodnotou ze tří jednotlivých výsledků, kdy každý výsledek je vyjádřen s přesností na 0,1 MPa. [10]



Obr. 4: Porušený vzorek po zkoušce v tahu za ohybu

6.3.1. Pevnost v tlaku

Zkouška je provedena na polovinách zkušebních těles. Poloviny trámečků se vystředí bočními stranami v rozmezí $\pm 0,5$ mm na destičkách zkušebního přístroje a délkově se zorientují tak, aby koncové strany trámečků přesahovaly cca 10 mm destičky. Zatížení se zvyšuje plynule rychlostí (2400 ± 200) N/s do porušení.

Pevnost v tlaku se vypočítá dle vztahu (3):

$$R_c = \frac{F_c}{1600} [MPa] \quad (3)$$

R_c – pevnost v tlaku v MPa

F_c – nejvyšší zatížení vynaložené při porušení v N

1600 – plocha destiček v mm^2

Pevnost v tlaku se vyjádří průměrnou aritmetickou hodnotou ze šesti jednotlivých výsledků, kdy každý výsledek je vyjádřen s přesností na 0,1 MPa. [10]



Obr. 5: Porušený vzorek po tlakové zkoušce

6.4. Zkouška mrazuvzdornosti

Podstatou zkoušky je vystavení nasycených zkušebních těles střídavému zmrazování a rozmrazování, a to na požadovaný počet zmrazovacích cyklů nebo na stanovení stupně mrazuvzdornosti. Postup zkoušky je určen normou ČSN 73 1322 ZMĚNA Z1.

Mrazuvzdornost se zkouší na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, které zrály 28 dní. Ke zkoušce byl vyhotoven potřebný počet sad zkušebních těles, přičemž každá sada sestává ze tří trámečků. Počet sad se stanoví s ohledem na počet zmrazovacích etap a potřebu porovnávacích sad vzorků. Počet zmrazovacích cyklů a etap se stanovil s ohledem na požadovanou nebo předpokládanou mrazuvzdornost materiálu. Zpravidla se pro zkoušku mrazuvzdornosti volí dvě až čtyři zmrazovací etapy.

U zkušebních těles se před zmrazováním zjistí jejich rozměry a hmotnost, spolu s těmito parametry se vypočítá objemová hmotnost.

Zkušební tělesa se nasycují vodou po dobu 24 hodin ponořením do vodní lázně při teplotě $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ tak, aby voda byla nad povrchem těles nejméně 3 cm. Ihned po nasycení vodou se zmrazují.

Zmrazování a rozmrazování zkušebních těles probíhá v jednotlivých cyklech. Jeden cyklus sestává nejméně ze 4 hodin zmrazování a 2 hodin rozmrazování. Při zmrazování se tělesa ukládala do prostoru, který musel mít předem požadovanou teplotu, při rozmrazování

se zkušební tělesa ukládala do vody +20 °C teplé. Během zmrazování se tělesa pozorují a zaznamenávají se případně vzniklé poruchy.

Zkušební tělesa se po každé etapě změří, zváží a zjistí jejich objemové hmotnosti. První sada porovnávacích těles se zkouší na tah za ohybu při začátku zmrazování. Druhá sada porovnávacích těles se zkouší po ukončení zmrazovacích etap.

Zkouška mrazuvzdornosti se ukončí po ukončení předepsaného počtu zmrazovacích cyklů, nebo po ukončení zmrazovací etapy, při které byl zjištěn pokles pevnosti v tahu za ohybu větší než 25 % proti pevnosti v tahu za ohybu první porovnávací sady, nebo pokud jsou zkušební tělesa zjevně mrazem porušena.

Jako výsledek zkoušky se uvádí pevnosti trámečků v tahu za ohybu a zpravidla i pevnosti v tlaku úlomků trámů, a to zmrazovaných zkušebních těles a porovnávacích zkušebních těles, součinitel mrazuvzdornosti. [12]

Součinitel mrazuvzdornosti je poměr aritmetického průměru hodnot pevnosti v tahu za ohybu trámečků zmrazovaných k aritmetickému průměru hodnot pevností v tahu za ohybu trámečků porovnávacích druhé sady. Materiál se považuje za mrazuvzdorný na ten počet zmrazovacích cyklů, při kterých úbytek pevností zmrazovaných vzorků proti pevnostem porovnávacích vzorků není větší než 25 % pevnosti porovnávacích vzorků. [12]

Součinitel mrazuvzdornosti se vypočítá podle vzorce (4):

$$K_{M100} \frac{\mu_{M100}}{\mu_p} * 100 [\%] \quad (4)$$

K_{M100} - součinitel mrazuvzdornosti po 100 cyklech v %

μ_{M100} - aritmetický průměr pevnosti zmrazovaných trámečků v tahu za ohybu MPa

μ_p - aritmetický průměr pevnosti porovnávaných trámečků v tahu za ohybu MPa

6.5. Odolnost povrchu za působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Postup zkoušky je určen normou ČSN 73 1326 ZMĚNA Z1. Při experimentu byla použita zkouška metodou automatického cyklování. Její podstatou je udržet zkušební tělesa v určité době na záporných teplotách a naopak v agresivním prostředí 3% roztoku NaCl.

Pro průkazní a kontrolní zkoušky na tělesech byly použity minimálně 3 trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

Vzorky se vloží do připravené misky, do které se nalije roztok 3% NaCl v takovém množství, aby byl vzorek ponořen na výšku (5 ± 1) mm. Pak se vzorky s roztokem rozloží rovnoměrně po celé délce zkušebního prostoru přístroje.

Ve zkušebním prostoru se vzorky podrobí střídavému zamrzávání a rozmrazování. Jeden cyklus sestává z ochlazení zkušební plochy na $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, na které je udržován 15 minut. Pak následuje ohřev zkušební plochy na teplotu $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na této teplotě je udržován 15 minut.

Po každém 25. cyklu přístroj automaticky vypne zkoušení. To je doba, kdy se misky se vzorky opatrně vyjmou z prostoru zařízení. Vzorky se opatrně vyjmou z misky a proudem vody se opláchnou pomocí stříčky. Přebytná kapalina se opatrně z misky sleje tak, aby nedošlo k odplavení usazených odpadlých částic ze vzorku. Pak se proudem vody ze stříčky přepraví odpadlé částice do vysoušecí misky. Z té se přebytné množství vody opět sleje a odpadlé částice se vysuší při teplotě $105\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Odpady z jednotlivých cyklů se uschovávaly. Po dosažení hmotnosti odpadu nad 500 g/m^2 se doporučuje provést síťový rozbor odpadu na sítích o délkách stran ok 0,5; 1; 2 a 4 mm.

Odolnost povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek je dána hmotností odpadu na jednotku plochy. Mimo stanovení hmotnosti odpadu je možno hodnotit i stav vzorku vizuálně.

Hmotnostní odpad se vypočítá dle vztahu (5):

$$\rho_a = \frac{\Sigma m}{A} [g/mm^2] \quad (5)$$

Σm – součet všech hmotností odpadů od prvního do n-tého cyklu v g

A – velikost zkušební plochy v mm^2

Zkouška se ukončí buď po dosažení předepsaného počtu cyklů, nebo po dosažení maximální povolené velikosti ρ_a podle tabulky v normě. [13]

7. Příprava receptury a výroba zkušebních těles

Dávkování jednotlivých složek je znázorněno v tabulce č. 6. Navržené dávkování je určeno pro jednu záměs k výrobě zkušebních těles. Tato receptura byla převzata z Bakalářské práce J. Koňáříka. [14]

V receptuře došlo pouze ke změně používaného písku, a to z normového křemičitého na běžný stavební písek.

Tab. 6: Navržené směsi a jejich dávkování

Název směsi	Dávkování jednotlivých složek [g]				
	Cement	Struska	Aktivátor	Písek	Voda
Cement Hranice 52,5R	450			1350	150
Cement bílý 52,5R	450			1350	150
DESIL AL		450	135	1350	65
Sodné vodní sklo		450	83	1350	75
Draselné vodní sklo		450	176	1350	5
MKS		450	88	1350	140

Jako pojiva pro srovnávací tělesa byly použity: portlandský cement CEM I 52,5R a cement bílý 52,5R. Pro alkalicky aktivované systémy byla použita jemně mletá granulovaná vysokopecní struska Kotouč Štramberk.

Aktivátory: DESIL AL – koloidní roztok s přísadou hliníku
 Sodné vodní sklo
 Draselné vodní sklo
 MKS – Metakřemičitan sodný

Jako plnivo byl v experimentu namísto normového křemičitého písku použit běžný stavební písek frakce 0/4 z provozovny Tovačov firmy Českomoravské šterkovny a.s. Jedná se o těžný materiál s vysokým podílem zaoblených zrn.

7.1. Postup míchání

Pro namíchání směsí byla použita běžná laboratorní míchačka fy BETON System, odpovídající požadavkům ČSN EN 196 - 1.

Jednotlivé složky se naváží pomocí váhy, která má přesnost vážení $\pm 1\text{g}$. Každá záměs malty se zamíchá mechanicky za použití míchačky.

Postup míchání je následující:

- a) Do nádoby se vnese voda, aktivátor a poté struska.
- b) Ihned po přidání jednotlivých složek nádobu usadíme do míchačky a spustí se program pro míchání nízkou rychlostí (viz. Tab. 7), kde časový průběh míchání je po dobu 90 s, pak nastane přestávka 30 s, kde můžeme využít čas na setření malty. Po této přestávce se znovu uvede do chodu po dobu 90 s.
- c) Po dokončení míchání je vhodné znovu setřít maltu ze stěn nádoby. Poté se spustí míchání, kde po dobu 30 s pracuje míchačka při pomalých otáčkách. V této fázi se přisypává písek. Nadále se míchání spustí do vysokých otáček po dobu 30 s. Pak nastává pauza 90 s a s uplynutím této doby následné míchání ve vysokých otáčkách po dobu 60 s. [10]

Tab. 7: Rychlost otáček metly

	Otáčky kolem osy metly min^{-1}	Otáčky kolem osy nádoby min^{-1}
Při nízké rychlosti	140 \pm 5	62 \pm 5
Při vysoké rychlosti	285 \pm 10	125 \pm 10

7.2. Zhotovení zkušebních těles

Zkušebními tělesy musí být trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Formy byly ošetřeny minerálním olejem z důvodu snadnějšího odformování.

Čerstvá malta se ukládá do formy upevněná na vibračním stolku pomocí lžice. Malta se v každém oddíle formy rovnoměrně rozprostře cca do poloviny výšky a zhutní se po dobu 120 s. Vnese se druhá vrstva malty a zajistí její přebytek, rozprostře se a znovu zhutní po dobu 120 s. Přebytek malty se setře a pilovitým pohybem se uhladí povrch.

Na formy se položí skleněná deska spolu se štítkem z důvodu identifikace. [10]

7.3. Uložení a ošetřování zkušebních těles

Každá pokrytá forma se ihned uloží ve vodorovné poloze do vlhkostní skříně po dobu jimi určenou.

Vyjmutí zkušebních těles z forem se musí provádět opatrně, aby se zkušební tělesa nepoškodila. Při odformování docházelo k odtrhávání kusu zatvrdlé malty. Hlavně u alkalicky aktivovaných směsí. Pro zkoušky po 24 hodinách se vyjmutí zkušebních těles provede nejdříve 20 minut před zkoušením. Tělesa vyrobená pro pozdější dobu zkoušení byla vhodně popsána a uložena do vody na potřebnou dobu zrání. [10]

8. Materiálové vlastnosti

V rámci experimentu byly u připravených receptur ověřovány pevnosti v tahu a v tlaku po jednom, sedmi, osmadvaceti a šedesáti dnech zrání. U těles byla také ověřována odolnost povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, mrazuvzdornost a určení objemové hmotnosti ztvrdlého kompozitu.

8.1. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu po 1 dni

Jednotlivé formy s daným druhem malty byly uloženy 24 hodin ve vlhkostní skříně. Před zkouškou se tělesa vyjmuly z forem, změřily se u nich rozměry a hmotnost a určila jejich průměrnou objemovou hmotnost ztvrdlé malty. Poté jsou tělesa podrobena zkoušce v tahu za ohybu a tlaku (viz. Tab. 8).

Tab. 8: Pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 1 dni

Směs	DESIL AL	Cement bílý 52,5R	Cement Hranice 52,5R	Sodné vodní sklo	Draselné vodní sklo	Metakřemičitan sodný
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	0,7	5,1	5,5	x	2,7	3,2
Pevnost v tlaku [MPa]	3,6	26,8	28,7	x	20,2	19,2

x – došlo k rychlé deformaci vzorku

8.2. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu po 7 dnech

Jednotlivé formy s daným druhem malty byly uloženy 24 hodin ve vlhkostní skříni. Poté se odformovaly, popsaly a uložily na 7 dní do vodní lázně. Po uplynutí předepsané doby zrání se změřily rozměry, hmotnost a určila se průměrná objemová hmotnost. Následně došlo k provedení zkoušky v tahu za ohybu a tlaku (viz. Tab. 9).

Tab. 9: Pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 7 dnech

Směs	DESIL AL	Cement bílý 52,5R	Cement Hranice 52,5R	Sodné vodní sklo	Draselné vodní sklo	Metakřemičitan sodný
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	6,5	6,9	7,5	0,3	7,7	7,1
Pevnost v tlaku [MPa]	54,2	46,2	47,6	2,3	68,6	68,1

8.3. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu po 28 dnech

Jednotlivé formy s daným druhem malty byly uloženy 24 hodin ve vlhkostní skříni. Poté se odformovaly, popsaly a uložily na 28 dní do vodní lázně. Po uplynutí předepsané doby zrání se změřily rozměry, hmotnost a určila se průměrná objemová hmotnost. Následně došlo k provedení zkoušky v tahu za ohybu a tlaku (viz. Tab. 10).

Tab. 10: Pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 28 dnech

Směs	DESIL AL	Cement bílý 52,5R	Cement Hranice 52,5R	Sodné vodní sklo	Draselné vodní sklo	Metakřemičitan sodný
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	8,3	8,1	7,9	7,6	10	7,4
Pevnost v tlaku [MPa]	63,1	52,3	48,1	43,1	71	71,7

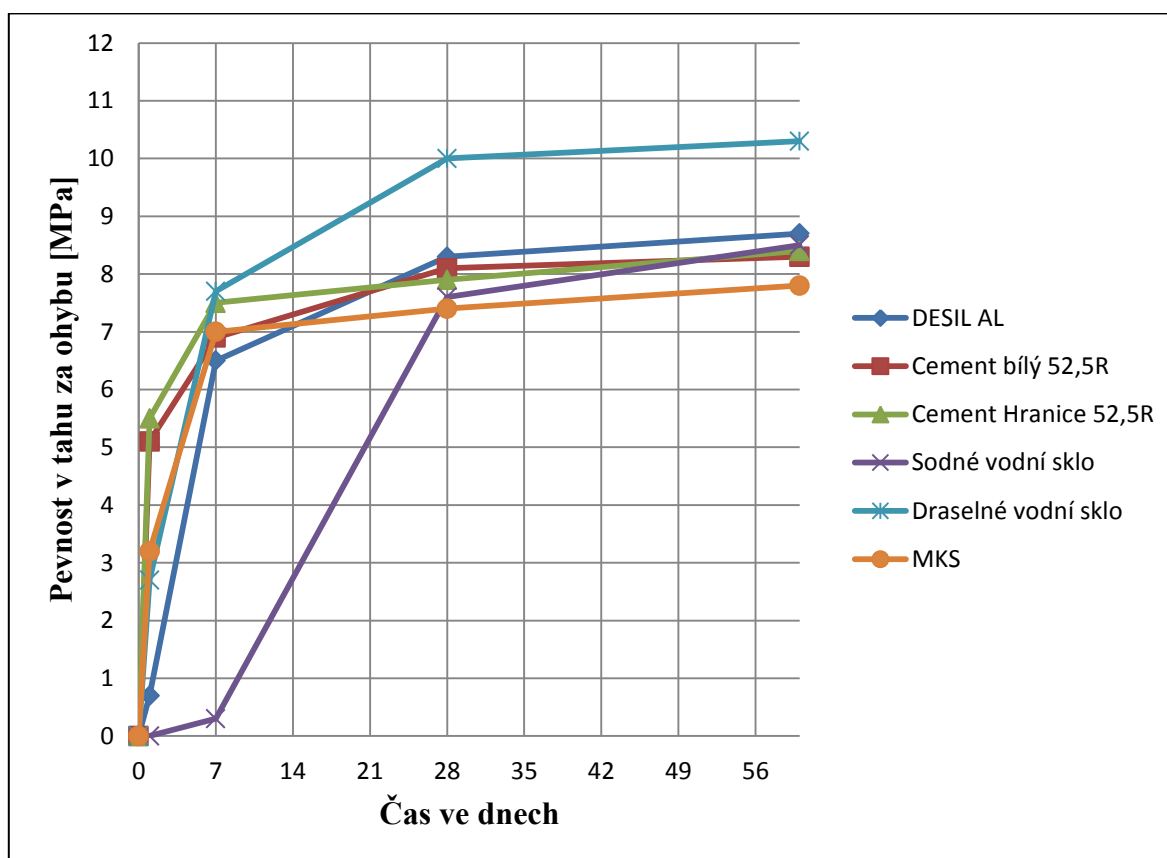
8.4. Pevnost v tlaku a tahu za ohybu po 60 dnech

Výsledky znázorněné v tabulce č. 11 jsou získány z referenčních vzorků použité při zkoušce mrazuvzdornosti, kdy byly uloženy ve vodě po dobu 60 dnů.

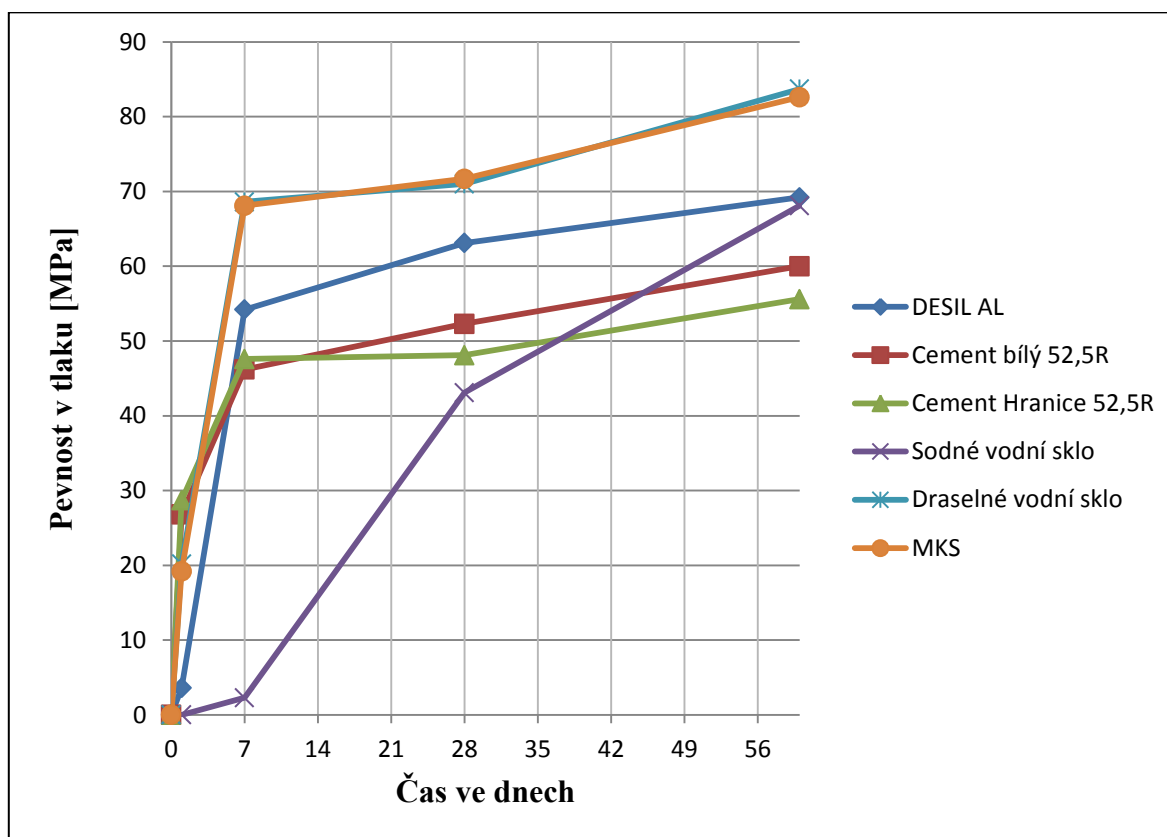
Tab. 11: Pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 60 dnech

Směs	DESIL AL	Cement bílý 52,5R	Cement Hranice 52,5R	Sodné vodní sklo	Draselné vodní sklo	Metakřemičitan sodný
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	8,7	8,3	8,4	8,5	10,3	7,8
Pevnost v tlaku [MPa]	69,2	60	55,6	68,1	83,7	82,6

Z naměřených pevností lze graficky vyjádřit jejich závislost na čase, tedy nárůst pevnosti v tlaku (Obr. 7) či tahu za ohybu v čase (Obr. 6).



Obr. 6: Grafické znázornění vývoje pevností těles v tahu za ohybu.

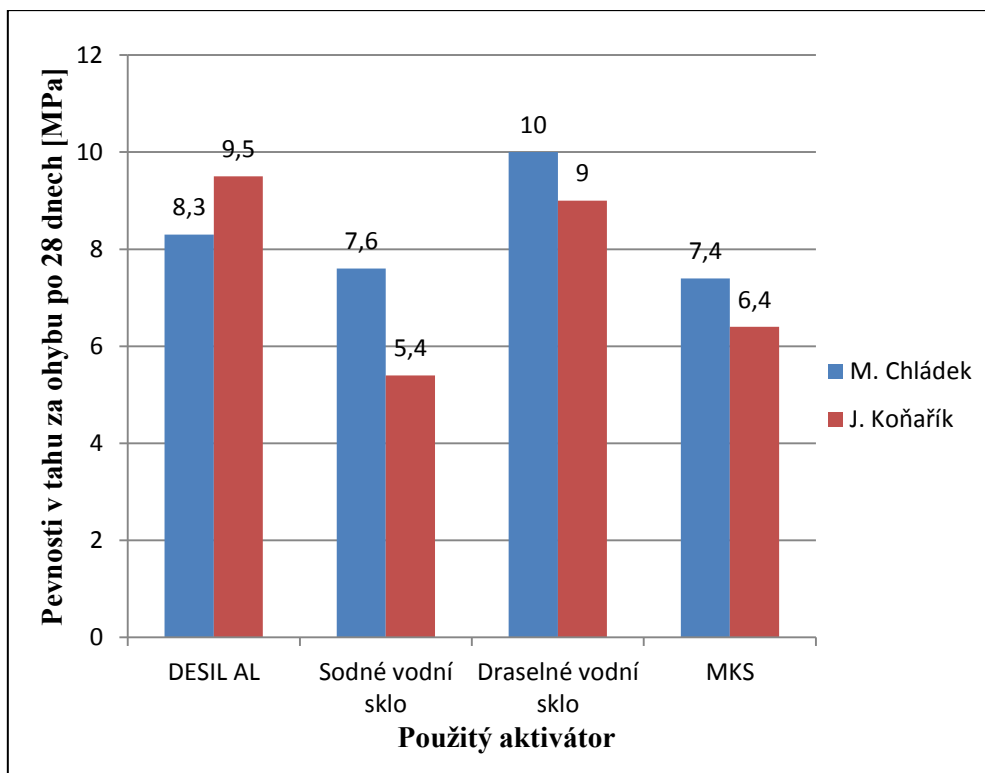


Obr. 7: Grafické znázornění vývoje pevností těles v tlaku.

Grafy můžeme zhodnotit následovně:

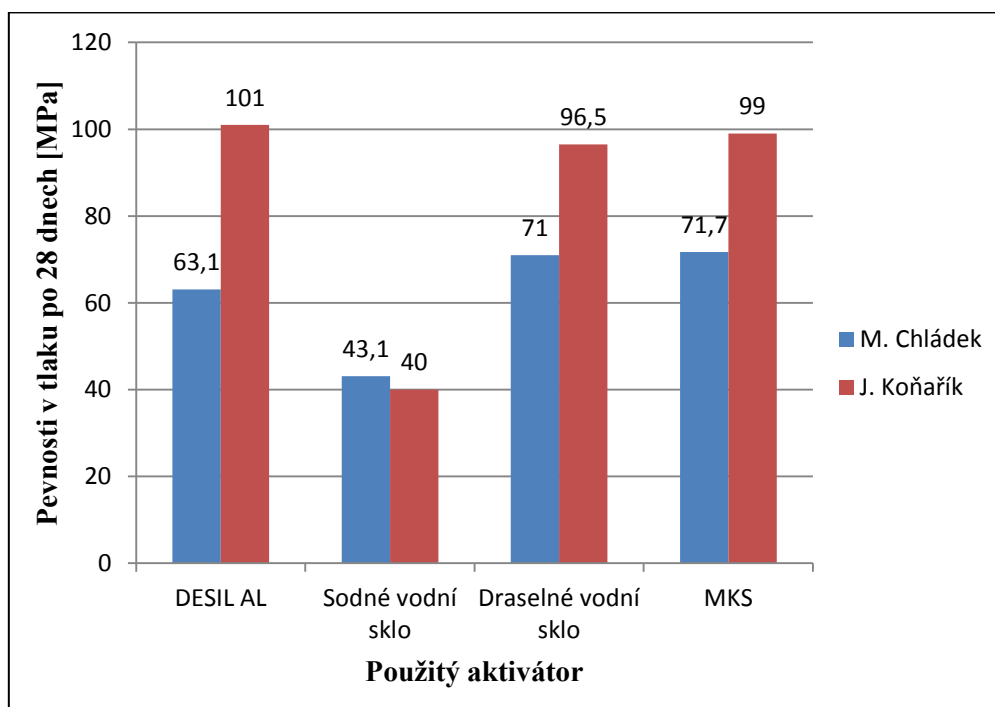
- Pevnosti cementů dosahovaly přibližně stejných hodnot, velké počáteční pevnosti oproti alkalicky aktivovaným kompozitům.
- Kompozit za použití metakřemičitanu sodného (MKS) v tlaku, vykazoval stejný průběh jako u draselného vodního skla.
- Za použití draselného vodního skla výsledný kompozit dosahuje nejlepších výsledků jak v tahu za ohybu tak i v tlaku.
- Výsledek sodného vodního skla byl nejslabší, zřetelný nárůst pevností proběhl až po 7 dnech zrání.

Další grafy (Obr. 8, 9) slouží pro porovnání. Znázorňují naměřené hodnoty v této práci spolu s hodnotami, které získal ve své práci J. Koňářík. Jedná se o pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 28 dnech. Na Obr. 8 můžeme zjistit, že při použití běžného stavebního písku kompozity dosahují vyšších pevností, než křemičitý písek v práci J. Koňáříka.



Obr. 8: Grafické porovnání dosažených pevností

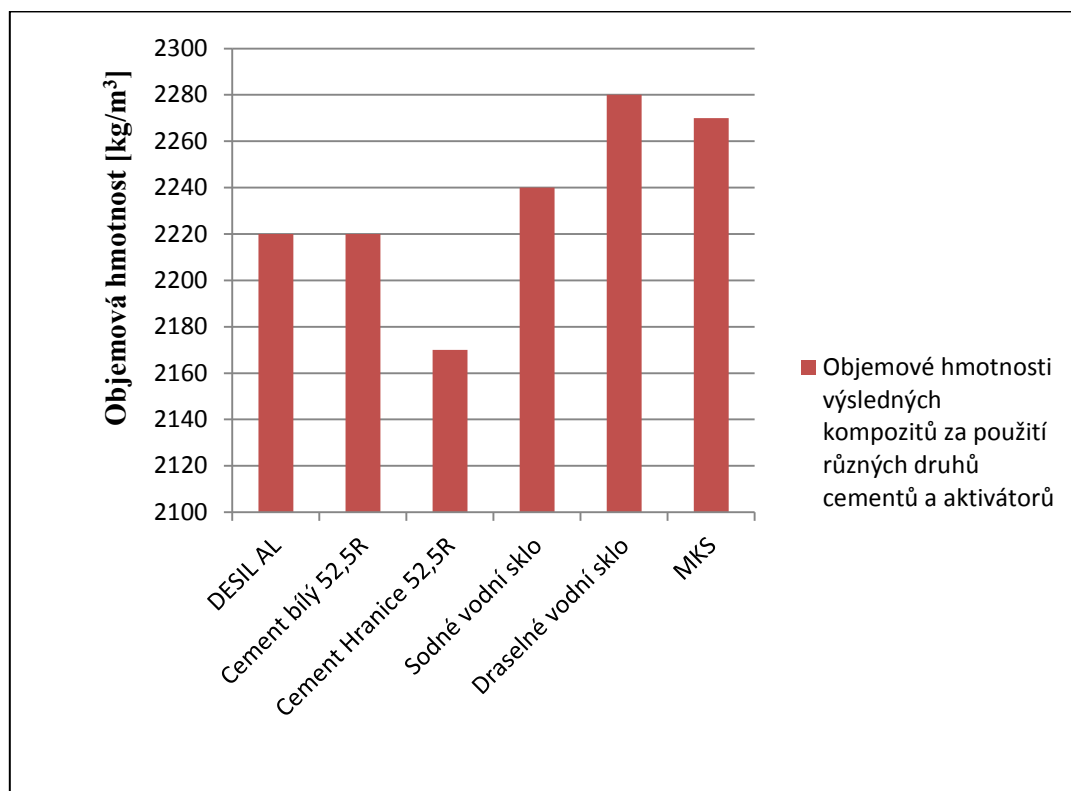
Z grafu (Obr. 9) vyplývá, že při použití normového křemičitého písku v kompozitu dochází k větším pevnostem v tlaku než u běžně používaného písku.



Obr. 9: Grafické porovnání dosažených pevností

8.4. Objemové hmotnosti

Objemové hmotnosti jednotlivých kompozitů se v čase výrazně neměnily a pohybovaly se tak v hodnotách uvedených v grafu. (Obr. 10)



Obr. 10: Grafické znázornění objemové hmotnosti jednotlivých vzorků

9. Vyhodnocení zkoušky CHRL

Odolnost povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek byla zjišťována vždy u tří trámeček od každé záměsi. Zkušební tělesa byla uložena ve vodní lázni po dobu 28 dní.

Po této době zrání byla vyjmuta a podrobena zkoušce. Jako hodnotící kritérium byl zvolen stupeň 3 – narušený povrch. Povolený odpad u tohoto stupně je do 1000 g/m² [13].

Naměřené hodnoty a výsledky hodnocení odolnosti jsou zřejmé z tab. 12.

Tab. 12: Výsledné odpady v jednotlivých cyklech

Směs	Cement bílý 52,5R	Cement Hranice 52,5R	MKS	Draselné vodní sklo	DESIL AL	Sodné vodní sklo
25 cyklů	1,2	0,4	13,2	45,2	184,0	695,0
odpad g/m²	47,6	15,9	523,8	1793,7	7301,6	27579,4
50 cyklů	3,4	1,2	11,6	29,8	131,0	66,2
celkem odpad (g)	4,6	1,6	24,8	75,0	315,0	761,2
odpad g/m²	182,5	63,5	984,1	2976,2	12500,0	30206,3
75 cyklů	138,0	3,6	12,8	43,8	38,2	41,4
celkem odpad (g)	142,6	5,2	37,6	118,8	353,2	802,6
odpad g/m²	5658,7	206,3	1492,1	4714,3	14015,9	31849,2
100 cyklů	Rozpad	18,6	9,0	20,4	14,6	31,0
celkem odpad (g)	Rozpad	23,8	46,6	139,2	367,8	833,6
odpad g/m²	Rozpad	944,4	1849,2	5523,8	14595,2	33079,4

Výsledky zkoušky CHRL tedy podle ČSN 73 1326 jsou:

Cement bílý 52,5R	183 - 50
Cement Hranice 52,5R	944 - 100
MKS	984 - 50
Draselné vodní sklo	1794 - 25
DESIL AL	7300 - 25
Sodné vodní sklo	27579 - 25

Nejllepších výsledků zkoušky CHRL bylo dosaženo u receptury portlandského cementu CEM I 52,5 R. Tělesa z bílého cementu, stejně jako tělesa z metakřemičitanu sodného vydržela 50 cyklů zatěžování, poté již došlo k nadměrnému nárůstu odpadu. U ostatních vzorků nebyla odolnost proti CHRL prokázána.

Vzhled těles po příslušných cyklech je znázorněn na obr. 11 – 16.



Obr. 11: Vzhled vzorku Cement Hranice 52,5R – po 100 cyklech



Obr. 12: Vzhled vzorku DESIL AL – po 100 cyklech



Obr. 13: Vzhled vzorku MKS – po 100 cyklech



Obr. 14: Vzhled vzorku Draselné vodní sklo – po 100 cyklech



Obr. 15: Vzhled vzorku Sodné vodní sklo – po 100 cyklech



Obr. 16: Vzhled vzorku Cement bílý 52,5R – po 100 cyklech (rozpad)

10. Vyhodnocení zkoušky mrazuvzdornosti

Pro zkoušku mrazuvzdornosti byly použity trámečky (40 x 40 x 160) mm po 28 dnech zrání.

Každá sada sestávala ze tří trámečků. Kontrola vzorků probíhala pravidelně po 25 cyklech. V případě, že nedošlo k porušení těles, byly vzorky podrobeny dalším zmrazovacím cyklům. Pokud se na zkušebních tělesech vyskytlo narušení vlivem zmrazování, byla zkouška ukončena a u těles byly zjištěny zbytkové pevnosti. Výsledky jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13: Vlastnosti těles po zkoušce mrazuvzdornosti

Směs	1	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
Počet cyklů	50	75	75	75	75	75	100	100	100	100	100
Pevnosti v tahu ohybem po zkoušce [MPa]	4,3	6,8	8,0	6,8	9,1	8,2	8,5	6,5	6,2	10,4	7,8
Pevnosti v tahu ohybem porovnávací [MPa]	7,2	7,2	8,8	7,3	9,2	8,8	8,7	8,3	7,8	10,3	8,7
Součinitel mrazuvzdornosti	0,60	0,94	0,91	0,93	0,99	0,93	0,97	0,78	0,79	1,01	0,90

1 - Sodné vodní sklo, 2 - Cement Hranice 52,5R, 3 - Cement bílý 52,5R, 4 – MKS, 5 - Draselné vodní sklo, 6 - DESIL AL

Zhodnocení výsledků:

- Všechny vzorky, až na směs sodného vodního skla, odolaly jednotlivým cyklům zmrazování.
- Vzorky, které odolaly 100 zmrazovacím cyklům a splnily požadavek na součinitel mrazuvzdornosti větší než 75 %, lze prohlásit za mrazuvzdorné. (Obr. 18 a 19).
- Při vizuální kontrole u většiny vzorků během zkoušky nebyla zjištěna žádná porušení a případný rozpad.
- Pouze směs sodného vodního skla neobstála po 50 cyklech, vznik trhlinek na povrchu, (Obr. 17) z dosažených výsledků ji nelze prohlásit za mrazuvzdornou.
- Nejlepších výsledků dosahovala směs draselného vodního skla, kde po 100 cyklech došlo k mírnému nárůstu pevnosti u zkoušeného tělesa.



Obr. 17: Vzhled vzorku sodné vodní sklo – po 100 cyklech



Obr. 18: Vzhled vzorků po 100 cyklech, vlevo – Cement bílý 52,5, vpravo – Draselné vodní sklo



Obr. 19: Vzhled vzorků po 100 cyklech, vlevo – MKS, vpravo – DESIL AL

Závěr

Cílem práce bylo ověření vlivu použitého typu aktivátoru a zvoleného druhu kameniva na základní fyzikálně-mechanické a trvanlivostní vlastnosti alkalicky aktivovaných hmot.

Byly připraveny čtyři druhy směsí na bázi alkalicky aktivované vysokopecní strusky s rozdílnými druhy aktivátorů, konkrétně se sodným vodním sklem, draselným vodním sklem, koloidním roztokem s přísadou hliníku DESIL AL a metakřemičitanem sodným.

Pro možnost srovnání byla vyhotovena také tělesa z komerčně dostupných materiálů, konkrétně byl použit portlandský cement 52,5R a bílý cement 52,5R.

V experimentu byl místo normovaného křemičitého písku používán běžný stavební písek frakce 0/4 od firmy Českomoravské šterkovny a.s. z provozovny Tovačov.

V rámci experimentu byly na připravených tělesech stanoveny pevnosti v tahu a tlaku po jednom, sedmi, osmadvaceti a šedesáti dnech zrání, byla testována odolnost povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek, dále byla provedena zkouška mrazuvzdornosti a stanovení objemové hmotnosti.

Nejvyšších pevností bylo dosaženo u alkalicky aktivovaných systémů, v nichž byl jako aktivátor použit metakřemičitan sodný bezvodý a draselné vodní sklo. Získané pevnosti u alkalicky aktivovaných systémů se pohybovaly v tahu za ohybu cca 7 – 10 MPa, v tlaku 40 – 80 MPa. Objemová hmotnost v rozmezí 2220 – 2280 kg/m³. Vzorky prokázaly jen minimální odolnost povrchu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Odolnost povrchu proti působení chemicky rozmrazovacích látek nebyla prokázána. Dále byla ověřena mrazuvzdornost zkoušených vzorků, kromě kompozitu se sodným vodním sklem.

Z výsledků je patrné že použití běžného stavebního písku v konečné fázi ovlivní některé vlastnosti, hlavně co se týče pevnosti v tlaku a odolnost povrchu proti chemicky rozmrazovacím látkám.

Směs připravená s použitím sodného vodního skla jako aktivátoru vykazovala výrazně rozdílné vlastnosti, než tomu bylo u předchozích experimentů, prováděných v laboratoři stavebních hmot, zaměřených na vývoj alkalicky aktivovaných materiálů. Jelikož tento problém vyvstal i u dalších, souběžně řešených experimentů na Katedře stavebních hmot a diagnostiky staveb, a v souvislosti s dodáním nové várky vodního skla (i když od stejného výrobce), bude nutné zajistit chemický rozbor tohoto vodního skla a zjistit, co mohlo způsobit uvedené změny konečných vlastností připravených těles.

V rámci dalšího výzkumu doporučuji změnu druhu písku vzhledem k výsledkům v experimentu.

Seznam použité literatury

- [1] Škvára, F.: *Alkalicky aktivované materiály geopolymery*. Ústav skla a keramiky, VŠCHT v Praze, přístupno z <http://www.vscht.cz>
- [2] kolektiv autorů: *Současný stav výzkumu v oblasti geopolimerů*. Česká rozvojová agentura, O.P.S, 385s. (2005)
- [3] SHI, Caijun, KRIVENKO, Pavel V., ROY, Della. *Alkali-Activated Cements and Concretes*. 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN : Taylor & Francis, 2006. 376 s. ISBN 0-415-70004-3.
- [4] www.claypolymers.com
- [5] http://homel.vsb.cz/~khe0007/Predmety/Stavebni%20hmoty/Prednaska_c.6.pdf
- [6] <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/vyhody-a-nevyhody-betonu>
- [7] <http://www.geostone.cz/>
- [8] http://www.cihlovyrecyklat.cz/cihelny_recyklat.html
- [9] <http://www.vodnisklo.cz/cz/ke-stazeni>
- [10] ČSN EN 196-1 *Metody zkoušení cementu - Stanovení pevnosti*. Český normalizační institut (2005).
- [11] ČSN 12390-7 *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Český normalizační institut (2001)
- [12] ČSN 73 1322 ZMĚNA Z1: *Stanovení mrazuvzdornosti betonu*. Český normalizační institut (2003)
- [13] ČSN 73 1326 ZMĚNA Z1: *Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek*. Český normalizační institut (2003)
- [14] KOŇAŘÍK, J., *Vliv aktivátoru na základní vlastnosti alkalicky aktivovaných systémů* Bakalářská práce. VŠB -TUO, Fakulta stavební, 2014, 90 s.
- [15] <http://www.ebeton.cz/pojmy/hydratace>
- [16] <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewArticle/1492/1762>
- [17] Brandštetr, J., Krivenko, P.V.: *Alkalické cementy a betony*. SILIKA, s. 26 – 28 (1999)
- [18] Brandštetr, J., Koloušek, D., Vorel, J., Opravil, T., Bayer, P.: *Geopolymery, geopolymerní cementy a betony*. SILIKA, č. 7 – 8, s. 208 - 211 (2005)

- [19] JIŘIČKOVÁ, Milena a Martin KEPPERT. *Chemie: chemie stavebních materiálů*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 197 s. ISBN 978-80-01-04237-3.
- [20] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIAM, 2000, 390 s. Učebnice (VUTIAM). ISBN 80-214-1647-5.

Přílohy

Příloha 1	Prohlášení o shodě šterkopísku
Příloha 2	Prohlášení o vlastnostech pro strusku (L020-CPD-0700372)
Příloha 3	Technický list vodní sklo draselné
Příloha 4	Technický list metakřemičitan sodný
Příloha 5	Technický list vodní sklo sodné
Příloha 6	Technický list DESIL AL

Seznam obrázků

- Obr. 1: Elektrický topný panel AC Stone, vyroben na bázi geopolymerních hmot [7]
- Obr. 2: Hydratace cementu [15]
- Obr. 3: Teoretický model reakčního mechanismu alkalicky aktivované strusky podle
Fernándeze-Jiméneze [16]
- Obr. 4: Porušený vzorek po zkoušce v tahu za ohybu
- Obr. 5: Porušený vzorek po tlakové zkoušce
- Obr. 6: Grafické znázornění vývoje pevností těles v tahu za ohybu.
- Obr. 7: Grafické znázornění vývoje pevností těles v tlaku.
- Obr. 8: Grafické porovnání dosažených pevností
- Obr. 9: Grafické porovnání dosažených pevností
- Obr. 10: Grafické znázornění objemové hmotnosti jednotlivých vzorků
- Obr. 11: Vzhled vzorku Cement Hranice 52,5R – po 100 cyklech
- Obr. 12: Vzhled vzorku DESIL AL – po 100 cyklech
- Obr. 13: Vzhled vzorku MKS – po 100 cyklech
- Obr. 14: Vzhled vzorku Draselné vodní sklo – po 100 cyklech
- Obr. 15: Vzhled vzorku Sodné vodní sklo – po 100 cyklech
- Obr. 16: Vzhled vzorku Cement bílý 52,5R – po 100 cyklech (rozpad)
- Obr. 17: Vzhled vzorku sodné vodní sklo – po 100 cyklech
- Obr. 18: Vzhled vzorků po 100 cyklech, vlevo – Cement bílý 52,5, vpravo – Draselné vodní
sklo
- Obr. 19: Vzhled vzorků po 100 cyklech, vlevo – MKS, vpravo – DESIL AL

Seznam tabulek

Tab. 1: Základní charakteristiky strusky dle prohlášení o shodě.

Tab. 2: Složení vodního skla draselného

Tab. 3: Složení metakřemičitanu sodného

Tab. 4: Složení sodného vodního skla

Tab. 5: Složení sodného vodního skla

Tab. 6: Navržené směsi a jejich dávkování

Tab. 7: Rychlost otáček metly

Tab. 8: Pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 1 dni

Tab. 9: Pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 7 dnech

Tab. 10: Pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 28 dnech

Tab. 11: Pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 60 dnech

Tab. 12: Výsledné odpady v jednotlivých cyklech

Tab. 13: Vlastnosti těles po zkoušce mrazuvzdornosti

Příloha 1

ES PROHLÁŠENÍ O SHODĚ



1392

Výrobce:

Českomoravské šterkovny a.s.

Mokrá 359

664 05 MOKRÁ

IČ: 63475511

04

1392-CPD-095

Provozovna:	Tovačov	Frakce kameniva:	0/4
-------------	----------------	------------------	------------

Přírodní těžené kamenivo

Charakteristika	Vyjádření	EN 12620	EN13043	EN13139	EN 13242
Zrnatost	kategorie	G _F 85	G _A 85	vyhovuje	G _F 85
Tolerance pro zrnatost HK	kategorie	-	-	-	-
Tolerance pro zrnatost DK a směsi	kategorie	NPD	G _{T0} 20	vyhovuje	GT _F 20
Drobná zrna pod 0,5 mm	kategorie	-	-	CP 5-45	-
Obsah jemných částic	kategorie	f ₅	f ₅	kategorie 1	f ₅
Jakost jemných částic	kategorie	NPD	NPD	NPD	NPD
Tvarový index	kategorie	-	-	-	-
Index plochosti	kategorie	-	-	-	-
Délka zrna	kategorie	-	-	-	-
Obsah schránek živočichů	kategorie	NPD	-	NPD	-
Podíl ostrohranných zrn v HK	kategorie	-	-	-	-
Odolnost proti drcení-Los Angeles	kategorie	-	-	-	-
Odolnost proti drcení v rázu	kategorie	NPD	NPD	-	NPD
Odolnost proti otěru	kategorie	NPD	NPD	-	NPD
Odolnost proti ohladitelnosti	kategorie	NPD	NPD	-	-
Odolnost proti povrchovému obrusu	kategorie	NPD	NPD	-	-
Odolnost proti zmrazování a rozmrazování	kategorie	NPD	NPD	NPD	NPD
Odolnost vůči tepelným šokům	dekl. hodnota	-	NPD	-	-
Objemová hmotnost	dekl. hodnota	2,619	2,619	2,619	2,619
Sypná hmotnost	dekl. hodnota	1,566	1,566	1,566	1,566
Nasákavost	dekl. hodnota	1,5	2	2	2
Objemová stálost	vyhov./nevyhov.	NPD	-	-	-
Alkalicko-křemičitá reakce	vyhov./nevyhov.	vyhovuje	-	NPD	-
Chloridy	dekl. hodnota	0,0004	-	0,0004	-
Síraný rozpustný v kyselině	kategorie	AS _{0,2}	-	AS _{0,2}	AS _{0,2}
Celková síra	vyhov./nevyhov.	vyhovuje S ₁	vyhovuje S ₁	vyhovuje S ₁	vyhovuje S ₁
Chemické složení	dekl. hodnota	-	NPD	-	-
Afinita mezi HK a asfaltovým pojivem	dekl. hodnota	-	NPD	-	-
Obsah lehkých znečišťujících částic	dekl. hodnota	max. 0,01	-	-	-
Obsah humusovitých částic	vyhov./nevyhov.	vyhovuje	-	vyhovuje	vyhovuje
Obsah oxidu uhličitého	dekl. hodnota	NPD	-	-	-
Obsah přírodních radionuklidů	vyhov./nevyhov.	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje	vyhovuje
Druh kameniva	název	šterkopísek			

Výrobek je v souladu s přílohami ZA příslušných EN norem.

V Mokrém, dne 1.6.2004

ČESKOMORAVSKÉ ŠTERKOVNY A.S.
Mokrá 359, PSČ 664 05
IČ: 63475511

RNDr. Václav Bližkovský
vedoucí OKŘJ-zmocněná osoba

Příloha 2



Prohlášení o vlastnostech č. 1020-CPD-070037230

- 1) Jedinečný identifikační kód typu výrobku :
Mletá granulovaná vysokopecní struska ve shodě s ČSN EN 15167-1
- 2) Typ, šarže nebo sériové číslo nebo jiné označení umožňující identifikaci stavebního výrobku podle článku 11, odstavec 4 :
SMŠ 400
- 3) Zamýšlené použití nebo zamýšlená použití stavebního výrobku v souladu s příslušnou harmonizovanou technickou specifikací podle předpokladu výrobce:

Příměs typu II do betonů z betonu, včetně betonu vyráběného na staveništi nebo prefabrikovaných betonových dílců podle EN 206-1. Mletá granulovaná vysokopecní struska může být také použita do malt a injektážních malt. K použití jako hlavní složka a složky pro výrobu cementů CEM dle ČSN EN 197-1; ČSN EN 197-4 ; ČSN EN 14216.

Podle § 13 zákona 22/1997 Sb. ve znění pozdějších předpisů, splňuje základní požadavky a je za podmínek výše uvedeného použití bezpečný.
- 4) Jméno, registrovaný obchodní název nebo registrovaná obchodní známka a kontaktní adresa výrobce podle článku 11, odstavec 5:

KOTOUC ŠTRAMBERK, spol. s r. o., Libotín 500,
742 66 Štramberk
- 5) Případně název a kontaktní adresa zodpovědné osoby, která je tímto pověřena podle článku 12, odstavec 2

Není relevantní pro výrobce podle článku 12
- 6) Systém nebo systémy posuzování a ověřování stálosti vlastností stavebních výrobků:

Systém 1+
- 7) Oznámený subjekt

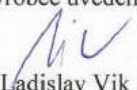
"Technický a zkušební ústav stavební Praha, s.p., Prosecká 811/76a, Praha 9, NB 1020 provedl počáteční zkoušku typu výrobku podle systému 1+ a vydal ES Certifikát shody 1020-CPD-070037230."
- 8) Vlastnosti uvedené v prohlášení

Základní charakteristiky	Vlastnosti	Harmonizovaná technická specifikace
Pevnost v tlaku po 7 dnech (Index účinnosti)	$\geq 45 \%$	EN 15167-1
Pevnost v tlaku po 28 dnech (Index účinnosti)	$\geq 70 \%$	
Počátek tuhnutí	$t < t_{\text{cementu}} \times 2$	
Jemnost	$\geq 400 \text{ m}^2/\text{kg}$	
Obsah oxidu hořečnatého	$\leq 18,0 \%$	
Obsah sulfidů	$\leq 2,0 \%$	
Obsah síranů	$\leq 2,5 \%$	
Ztráta žháním	$\leq 3,0 \%$	
Obsah chloridů	$\leq 0,1 \%$	
Obsah vlhkosti	$\leq 1,0 \%$	
Trvanlivost	viz tabulka ZA.1 EN 15167-1	

Uvolňování nebezpečných látek a radioaktivní záření	Vyhláška č. 499/2005 Sb. v platném znění	
---	--	--

- 9) Vlastnosti výrobku uvedeného v bodě 1 a 2 jsou ve shodě s vlastnostmi uvedenými v bodě 8.
Toto prohlášení o vlastnostech se vydává na výhradní odpovědnost výrobce uvedeného v bodě 4.
Jménem výrobce:

Ve Štamberku dne 1. 1. 2014


Ing. Ladislav Vik
ředitel společnosti

Příloha 3



VODNÍ SKLO DRASELNÉ

Obecné vlastnosti: Vodní sklo draselné je čirá nebo slabě zakalená viskózní kapalina, bezbarvá nebo lehce nažloutlá, neomezeně mísitelná s vodou.

Použití: K výrobě speciálních dezinfekčních a odmašťovacích prostředků, jako náplň do alkalických akumulátorů, jako pojivo do speciálních žáruvzdorných vyzdívek. Pro výrobu fasádních nátěrových hmot na silikátové bázi.

	DVS 1,7	DVS 2,5 B	DVS 3,0 A
Obsah K ₂ O min. % hm.	26,0-26,5	8,7-8,9	12
Obsah SiO ₂ min. % hm.	28,2-29	13,7-14,4	24
Sušina min. % hm.	54,2-55,75	22,4-23,3	36
Molární poměr SiO ₂ /K ₂ O	1,67 - 1,73	2,4 - 2,6	3,0 - 3,2
Hustota min. kg.m ⁻³	1650-1670	1180 - 1240	1350
Hustota °Bé	51 - 53		37 - 38
Viskozita mPa.s	110-230		25 - 35

	DVS 3,2-3,4	DVS 3,7 A	DVS 3,8-4,1 A
Obsah K ₂ O min. % hm.	12,5	8,5	7,3
Obsah SiO ₂ min. % hm.	27	20,3	19
Sušina min. % hm.	39,5	28,8	26,3
Molární poměr SiO ₂ /K ₂ O	3,2 - 3,4	3,65 - 3,75	3,8 - 4,1
Hustota min. kg.m ⁻³	min. 1350	1255	1240
Hustota °Bé	40	29 - 30	28 - 29
Viskozita mPa.s		8 - 12	15 - 25

Dle požadavků zákazníka lze upravit hodnoty molárního poměru SiO₂/K₂O a hodnotu hustoty.

15.2.2010



Balení:

- sudy o obsahu 200 l
- volně v železničních cisternách nebo autocisternách
- jiné obaly zákazníka od 50 l výše
- v případě obalů dodaných zákazníkem, výrobce neodpovídá za změny v kvalitě způsobené znečištěným obalem.

Doprava a skladování: Možno přepravovat a skladovat při teplotách vyšších než 0 °C.

Ochrana a bezpečnost práce: Podle zákona č. 356/2003 Sb. je výrobek klasifikován jako dráždivý s rizikovými větami:
 R 38 - Dráždí oči a kůži, R 41 - Nebezpečí vážného poškození očí.
 Při práci s ním je třeba chránit pokožku ochrannými rukavicemi, obličej štítem, tělo pracovním oděvem, gumovou zástěrou a obuví.

Likvidace výrobku: Malé množství vysrážet kyselinou chlorovodíkovou za vzniku kyseliny křemičité v tuhé formě, odvézt na příslušnou skládku. Likvidace obalů: Ocelové, pozinkované nebo plastové sudy odvézt do sběrných surovin.

Výrobce - provozovna:

Vodní sklo a.s., Krakovská 1346, Praha 110 00

1) Dornych 47, 656 16 Brno
 Tel.: +420 545 535 225
 Fax: +420 545 234 108

2) U Tonasa 172/2, 403 31 Ústí nad Labem
 Tel.: +420 475 245 364
 Fax: +420 475 507 164

e-mail: info@vodnisklo.cz
www.vodnisklo.cz

15.2.2010

Příloha 4



METAKŘEMIČITAN SODNÝ (5 H₂O)

Vlastnosti: Metakřemičitan sodný je bílý krystalický prášek o nesourodé velikosti částic, snadno rozpustný ve vodě na alkalický reagující roztok

Použití: Používá se zejména k výrobě průmyslových detergentů, pracích a dezinfekčních prostředků.

Jakostní ukazatelé:

	Na ₂ SiO ₃ ·5H ₂ O
SiO ₂	27,8 - 29,2 %
Na ₂ O	28,0 - 29,4 %
Molární poměr SiO ₂ /Na ₂ O	0,98 - 1,02
Ztráta žháním (600°C)	42,0 - 44,0 %
Fe	< 100 ppm
Ner rozpustná zbytek	< 0,02%
Sypný hmotnost	800 - 1000 g/l
pH (1% roztok)	12,5
Velikost částic	
1600 - 1250 μm	10 - 40%
1250 - 630 μm	30 - 90%
630 - 200 μm	< 25 %

Balení :

PE-pytle s obsahem 25 kg netto na dřevěných paletách

Big bagy (1000 kg)

Doprava a skladování:

Metakřemičitan sodný je možno transportovat v krytých dopravních prostředcích a skladovat v neporušených obalech v krytých a suchých prostorech.

Ochrana a bezpečnost práce :

Podle zákona č. 356/2003 Sb. je výrobek klasifikován jako žravý s rizikovými větami:

R34 - Způsobuje poleptání R37 - Dráždí dýchací orgány

Při potřísnění pokožku omýt proudem vody a ošetřit ochrannou masťou. Při zasažení očí vypláchnout co nejrychleji proudem čisté vody a vyhledat ihned lékařskou pomoc.

Vypracováno: 15.2.2010

Aktualizováno: 11.10.2010

Příloha 5



KITTFORT PRAHA
Hornáčky I
277 11 Neratovice

VODNÍ SKLO

PN:KT-B-17-01-09

Název výrobku

Vodní sklo

Složení

Vodní sklo sodné 36-38, křemičitá kyselina, sodná sůl

Odstín

Našedlá až načervenalá kapalina

Použití

Vodní sklo se používá ke konzervaci vajec nebo jako pojivo do žáruvzdorných malt a tmelů

DávkováníKonzervace vajec: 1 díl vodního skla + 9 dílů převařené vody. Na láhev o obsahu 5 litrů (50 ks vajec) stačí 2,5 litrů roztoku. Čistá omytá vejce vložíme do láhve a zalijeme roztokem.Pojivo do žáruvzdorných malt a tmelů: Rudokitt- univerzální žáruvzdorný tmel vodní sklo s vodou v poměru 2:1
Šamotová výmazová hmota-přibližně 2 polévkové lžíce na 1 kg šamotové hmoty**Bezpečnost a ochrana zdraví**

KLASIFIKACE: Xi - dráždivý

První pomoc

Při nadýchání: za běžné teploty má látka nízkou tenzi par. Pokud při nadýchání způsobí nepříznivé účinky, přesunout postiženého do nekontaminovaného prostředí. Vyhledat lékaře.

Při požití: při náhodném požití vypít asi půl litru vody nebo mléka a do 5 minut po požití vyvolat zvracení. Později zvracení nevyvolávat.

Při zasažení kůže: odložit kontaminovaný oděv a kůži omýt velkým množstvím vody.

Při zasažení očí: zasažené oko vyplachovat proudem vodou

Vzhled

kapalina našedlá až načervenalá

Balení

500ml, 11,5l

Záruční doba: 18 měsíců od data plnění uvedeného na obalu.

Příloha 6



Desil Al – geopolymer binder

DESIL Al is a colloidal solution with an additive Al which differs in its composition and properties from classic colloidal solutions of alkaline silicates, designated as water glasses.

DESIL Al is a colloidal solution whose framework is very similar to zeolitic structures. Atoms of aluminium create local negative charge which locates the Na ion more firmly. Thus the difference from classic water glass. It has reduced coagulative threshold and rigidity characteristics at higher temperatures.

Parameters:

Al	0,1 – 2 %
MP SiO ₂ /Na ₂ O	1,6 – 2,0
Density	1 470 – 1 570 kg/m ³

Application: Bonding agent in foundry industry, waste processing, production of detergents and cleaning agents, production of thermal insulating materials, flocculant water & wastewater treatment.

According to the customer's requirements, it is possible to adjust the values of SiO₂/Na₂O molar ratio and the value of density.

Packing - plastic barrels of a 200 liters capacity
IBC container 1 000 l
in bulk in tank cars or tank trucks

In case of packing delivered by a customer, the producer is not responsible for the changes of quality caused by a contaminated packing.

Transport and storage: Transport and store at the temperatures above 5 °C



Protection and labour safety:

According to the act nr. 356/2003 Sb, the product is classified as irritable with following risk sentences: R 38 – Irritates skin R 41 – Danger of severe eye damage.

While manipulating it is necessary to protect skin using protective gloves, face shield, working clothes, rubber apron and footwear.

Product disposal: Precipitate using hydrochlorid acid at the occurrence of silicic acid in solid form, take away to appropriate dumping ground.

Packaging disposal: Take away steel or plastic barrels to a junk.

Producer – premise: **Vodní sklo a.s. , Krakovská 1346/15, Praha 1, 110 00**

- 1) Ústí nad Labem, U Tonasa 172/2, 403 31
- 2) Brno, Dornych 47, 656 16

e-mail: info@vodnisklo.cz
www.vodnisklo.cz